

## СОДЕРЖАНИЕ

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

|                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Годунов А. И., Ерофеев М. В., Мельничук А. И., Ескибаев Е. Т., Мухамбетов А. М.</b><br>ИНФОРМАЦИОННОЕ ПОЛЕ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ<br>ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ..... | 5  |
| <b>Штыков Р. А., Алексеев А. В., Юрков Н. К.</b><br>ОПТИМИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ПРОКЛАДКИ ЛУПИНГА В НАКЛОННЫЙ<br>ГАЗОПРОВОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ .....                                                                       | 15 |
| <b>Данилин М. Е., Заяра А. В.</b><br>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ<br>ЭЛЕКТРОАППАРАТУРЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ .....                                                                         | 21 |
| <b>Белотелов В. Н.</b><br>МЕТОД ОКОННОГО СГЛАЖИВАНИЯ И КОРРЕКЦИИ ТРАЕКТОРИИ, ЗАДАННОЙ<br>В ВИДЕ ЗАШУМЛЕННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТОЧЕК .....                                                                                   | 31 |
| <b>Пешков И. В., Жигулин В. А., Фортунова Н. А.</b><br>РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ ПЕЛЕНГАТОРА<br>С СИСТЕМОЙ КАЛИБРОВКИ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ НА БАЗЕ ПЛИС .....                                                     | 41 |

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

|                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Бухенский К. В., Львова Т. А., Миронов В. В.</b><br>СИСТЕМА АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ<br>ПО ДАННЫМ ЕГЭ И ЕГО НЕЧЕТКАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ .....                                               | 57 |
| <b>Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Ескибаев Е. Т.</b><br>АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ<br>ОБРАБОТКИ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ВЫБОРЕ<br>ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ КОНТРОЛЬНОГО УСТРОЙСТВА .....    | 68 |
| <b>Воронин Е. А.</b><br>ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ<br>В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ<br>ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ БЕЗОПАСНОСТИ ИХ РАБОТЫ .....                                         | 75 |
| <b>Логинова Л. В., Трофимов А. А., Печерская Е. А., Рыбаков И. М., Северцев Н. А.</b><br>МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ<br>НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР «ПОЛИКРЕМНИЙ – ДИЭЛЕКТРИК» ..... | 85 |
| <b>Бейсембаева Б. С., Ежижанский В. Д., Яркин А. Е., Асеев Е. А., Реута Н. С.</b><br>МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОГО<br>РЕЖИМА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ .....                                          | 96 |

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Геращенко М. С., Семенов А. Д., Геращенко С. И., Горячев Н. В., Рыбаков И. М.</b><br>АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСОВЫХ ВОЛН,<br>ФОРМИРУЕМЫХ ГИДРОМАНЖЕТОЙ В ПРОЦЕССЕ ДЕКОМПРЕССИИ ..... | 103 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

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

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Клячкин В. Н., Ташниченко В. О.</b><br>К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МНОГОМЕРНОГО<br>СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ..... | 111 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Литвинов А. Н.</b><br>ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК<br>ЗАЛИТЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ ПРИБОРОВ..... | 119 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Литвинов А. Н.</b><br>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК<br>БЛОКОВ ПРИБОРОВ, ЗАЛИТЫХ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПАУНДАМИ..... | 124 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Байдаров Д. Ю., Григорьев А. С., Лосев О. Г., Сафронова Н. Н., Тутнов И. А.</b><br>ПЕРСПЕКТИВА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ<br>УСТАНОВОК И КОМПЛЕКСОВ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ..... | 130 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## **БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

|                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Маслобоев А. В., Цыгичко В. Н.</b><br>АДАПТАЦИЯ И РАЗВИТИЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕТОДОЛОГИИ<br>ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ<br>К УПРАВЛЕНИЮ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬЮ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР ..... | 140 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Старостин И. Е., Гавриленков С. И.</b><br>АРХИТЕКТУРА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЯДРА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ<br>РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МЕТОДА<br>МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ..... | 160 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

# RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

№ 4 (48) 2024

## CONTENT

### FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

|                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Godunov A.I., Yerofeev M.V., Melnichuk A.I., Eskibaev E.T., Mukhambetov A.M.</b><br>INFORMATION FIELD FOR DETECTING SMALL-SIZED UNMANNED<br>AERIAL VEHICLES IN SPACE BASED ON NEURAL NETWORKS..... | 5  |
| <b>Shtykov R.A., Alekseev A.V., Yurkov N.K.</b><br>OPTIMIZATION OF THE EVALUATION OF THE LUPING INSTALLATION<br>IN AN INCLINED GAS PIPELINE UNDER VARIOUS FLOW CONDITIONS.....                        | 15 |
| <b>Danilin M.E., Zayara A.V.</b><br>SIMULATION OF THE PROCESS OF TECHNICAL STATUS<br>OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF ROBOTICS COMPLEXES.....                                                               | 21 |
| <b>Belotelov V.N.</b><br>A METHOD OF WINDOW FILTERING AND TRAJECTORY<br>CORRECTION FOR A NOISY POINT SEQUENCE.....                                                                                    | 31 |
| <b>Peshkov I.V., Zhigulin V.A., Fortunova N.A.</b><br>DEVELOPMENT OF A HARDWARE AND SOFTWARE MODEL OF A DIRECTION FINDER<br>WITH A MUTUAL INFLUENCE CALIBRATION SYSTEM BASED ON FPGA.....             | 41 |

### DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

|                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Bukhenskiy K.V., Lvova T.L., Mironov V.V.</b><br>THE SYSTEM OF ANALYZING THE QUALITY<br>OF MATHEMATICAL KNOWLEDGE OF STUDENTS ACCORDING<br>TO THE UNIFIED STATE EXAM AND ITS FUZZY CLUSTERING .....      | 57 |
| <b>Novomeisky D.N., Piganov M.N., Eskibaev E.T.</b><br>ANALYSIS OF THE METHODOLOGICAL ERROR OF ELECTROPHYSICAL PROCESSING<br>OF FILM RESISTORS WHEN CHOOSING THE MEASURING PART OF THE CONTROL DEVICE ..... | 68 |
| <b>Voronin E.A.</b><br>THE USE OF MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES IN THE TASKS<br>OF EVALUATING AND ENSURING THE RELIABILITY OF TECHNICAL<br>SYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT THE SAFETY OF THEIR OPERATION ..... | 75 |
| <b>Loginova L.V., Trofimov A.A., Pecherskaya E.A., Rybakov I.M., Severtsev N.A.</b><br>MODELING OF HIGH-TEMPERATURE SENSORS PRESSURE<br>BASED ON TECHNOLOGICAL STRUCTURES "POLYSILICON-DIELECTRIC" .....    | 85 |
| <b>Beysembaeva B.S., Ezhizhanskiy V.D., Yarkin A.E., Aseev E.A., Reuta N.S.</b><br>METHODS AND MEANS OF ENSURING THE THERMAL REGIME<br>OF ELECTRONIC EQUIPMENT .....                                        | 96 |

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Gerashchenko M.S., Semenov A.D., Gerashchenko S.I., Goryachev N.V., Rybakov I.M.</b><br>AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF PULSE WAVES<br>FORMED BY A HYDROMUCHER DURING DECOMPRESSION ..... | 103 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

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

|                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Klyachkin V.N., Tashnichenko V.O.</b><br>ON THE ISSUE OF OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS<br>OF MULTIVARIATE STATISTICAL PROCESS CONTROL ..... | 111 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Litvinov A.N.</b><br>FORECASTING OF DYNAMIC CHARACTERISTICS<br>OF FLOODED ELECTRONIC DEVICE BLOCKS..... | 119 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Litvinov A.N.</b><br>EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS<br>OF DEVICE BLOCKS FILLED WITH POLYMER COMPOUNDS..... | 124 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Baydarov D.Yu., Grigoriev A.S., Losev O.G., Safronova N.N., Tutnov I.A.</b><br>THE PROSPECT OF PRACTICAL APPLICATION POWER PLANTS<br>AND COMPLEXES LOW-POWER POWER SUPPLY ..... | 130 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

|                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Masloboev A.V., Tsygichko V.N.</b><br>ADAPTING AND EXPANDING THE RISK-DRIVEN METHODOLOGY OF CRITICAL<br>ENTITIES PROTECTION TO CRITICAL INFRASTRUCTURE RESILIENCE MANAGEMENT ..... | 140 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Starostin I.E., Gavrilentov S.I.</b><br>ARCHITECTURE OF THE MATHEMATICAL CORE OF DIGITAL TWINS<br>OF VARIOUS PHYSICAL AND CHEMICAL SYSTEMS BASED ON THE METHOD<br>OF MATHEMATICAL PROTOTYPING OF ENERGY PROCESSES ..... | 160 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

## FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 623.4.021.4

doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-1

### ИНФОРМАЦИОННОЕ ПОЛЕ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А. И. Годунов<sup>1</sup>, М. В. Ерофеев<sup>2</sup>, А. И. Мельничук<sup>3</sup>, Е. Т. Ескибаев<sup>4</sup>, А. М. Мухамбетов<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

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

<sup>4,5</sup> Военный институт сил воздушной обороны, Актобе, Казахстан

<sup>1</sup> avitelpgu@mail.ru, <sup>2</sup> mihail.erofeew@mail.ru, <sup>3</sup> pelmenio@mail.ru,

<sup>4</sup> erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru, <sup>5</sup> suimbayeva@internet.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Современные малогабаритные беспилотные летательные аппараты (МБЛА) выполняют разнообразные задачи, такие как наблюдение, целеуказание, нанесение ударов, транспортировка грузов и т.д. *Материалы и методы.* Исследование сосредоточено на выборе наилучшего комплекса построения информационного поля на основе нейронных сетей. *Результаты и выводы.* Предложенный комплекс позволит осуществлять контроль воздействия средств противодействия МБЛА и корректировку выбора наиболее эффективного средства борьбы с ними в различных условиях. К различным условиям относятся: скрытая работа комплексов обнаружения и борьбы, средства радиоэлектронной борьбы и активные воздействия МБЛА и противодействия им, а также сложный рельеф, населенные пункты с разной этажностью и т.п.

**Ключевые слова:** МБЛА, обнаружение, нейронные сети, информационное поле

**Для цитирования:** Годунов А. И., Ерофеев М. В., Мельничук А. И., Ескибаев Е. Т., Мухамбетов А. М. Информационное поле обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в пространстве на основе нейронных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 5–14. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-1

### INFORMATION FIELD FOR DETECTING SMALL-SIZED UNMANNED AERIAL VEHICLES IN SPACE BASED ON NEURAL NETWORKS

A.I. Godunov<sup>1</sup>, M.V. Yerofeev<sup>2</sup>, A.I. Melnichuk<sup>3</sup>, E.T. Eskibaev<sup>4</sup>, A.M. Mukhambetov<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

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

<sup>4,5</sup> Military Institute of Air Defense Forces, Aktobe, Kazakhstan

<sup>1</sup> avitelpgu@mail.ru, <sup>2</sup> mihail.erofeew@mail.ru, <sup>3</sup> pelmenio@mail.ru,

<sup>4</sup> erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru, <sup>5</sup> suimbayeva@internet.ru

**Abstract.** *Background.* Modern small unmanned aerial vehicles (UAVs) perform a variety of tasks, such as surveillance, target designation, strikes, cargo transportation, etc. *Materials and methods.* The study is focused on choosing the best complex for constructing an information field based on neural networks. *Results and conclusions.* The proposed complex will allow monitoring the impact of countermeasures to UAVs and adjusting the choice of the most effective means of combating them in various conditions. Various conditions include: covert operation of detection and control systems, electronic warfare and active impacts of UAVs and counteraction to them, as well as complex terrain, populated areas with different numbers of storeys, etc.

**Keywords:** UAVs, detection, neural networks, information field

**For citation:** Godunov A.I., Yerofeev M.V., Melnichuk A.I., Eskibaev E.T., Mukhambetov A.M. Information field for detecting small-sized unmanned aerial vehicles in space based on neural networks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):5–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-1

## Введение

В настоящее время возрастает необходимость в системах, которые способны не только выполнять однажды запрограммированную последовательность действий над заранее определенными данными, но и способны сами анализировать вновь поступающую информацию, находить в ней закономерности, производить прогнозирование и т.д. В этой области приложений самым лучшим образом зарекомендовали себя так называемые искусственные нейронные сети (ИНС) – самообучающиеся системы, имитирующие деятельность человеческого мозга [1].

Для обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (МБЛА) выбираем многослойный персептрон, структура которого показана на рис. 1. В качестве исходных данных имеем [2]: размерность вектора входного сигнала ( $N_x$ ), размерность вектора выходного сигнала ( $N_y$ ), количество особых точек на изображении цели обучающей выборки ( $N_p$ ).

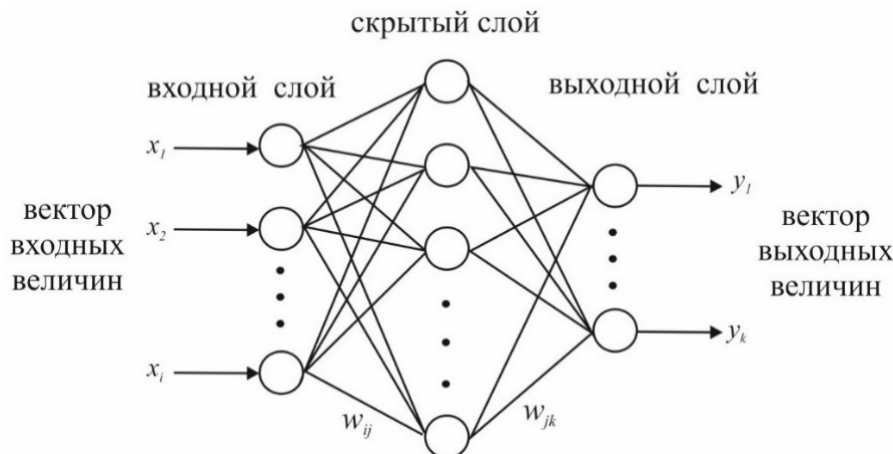


Рис. 1. Многослойный персептрон

Так, число нейронов скрытого слоя ( $N_{ск}$ ) двухслойного персептрона будет равно [2]:

$$N_{ск} = \frac{N_w}{N_x + N_y}. \quad (1)$$

## Распознавание и обнаружение МБЛА

Процесс распознавания цели с помощью ИНС состоит из трех этапов. Первый – это извлечение признаков из эталонных изображений по алгоритму обнаружения особых точек SURF и формирование из них базы данных; второй этап – определение ( $N_{ск}$ ) и обучение нейронной сети с использованием этих данных и желаемых выходов  $\tilde{y}_i$ ; третий этап – это этап распознавания объекта, в процессе которого извлечены признаки из текущего изображения и применены в ходе построения нейронной сети [2]. При этом на этапе распознавания цели при использовании разработанной ИНС, в которой получено оптимальное число нейронов в скрытом слое ( $N_{ск} = 37$ ), имеем возможность ее обучения с целью получения высокой вероятности распознавания  $P_{расп} \approx 0,99$ .

Используя процесс распознавания МБЛА с помощью ИНС, необходимо выбрать из существующих способов определения пространственных координат наиболее эффективные для построения информационного поля обнаружения МБЛА. Анализ патентов по данной тематике выявил направление обнаружения МБЛА и показал, что наиболее эффективными являются пеленгационный и стереоскопический методы [3–6].

В настоящее время пеленгационный метод определения координат объектов широко распространен в практике оптических и радиолокационных внешнетраекторных измерений. Он основан на измерении угловых координат объекта в горизонтальной (азимут или дирекционный угол) и вертикальной (угол места) плоскостях. В этом случае достаточно двух измерительных пунктов, чтобы однозначно определить пространственные координаты летательного аппарата [4].

Стереоскопическим методом обнаружение МБЛА (рис. 2) происходит на основе сравнения кадров видеопоследовательности и определения геометрических и цветовых изменений сформированных изображений двумя телевизионными датчиками, при этом ЭВМ автоматически выбирает основной телевизионный датчик для определения дальности до МБЛА, в данном случае – 1 и для определения угла  $\gamma$  телевизионный датчик – 2.

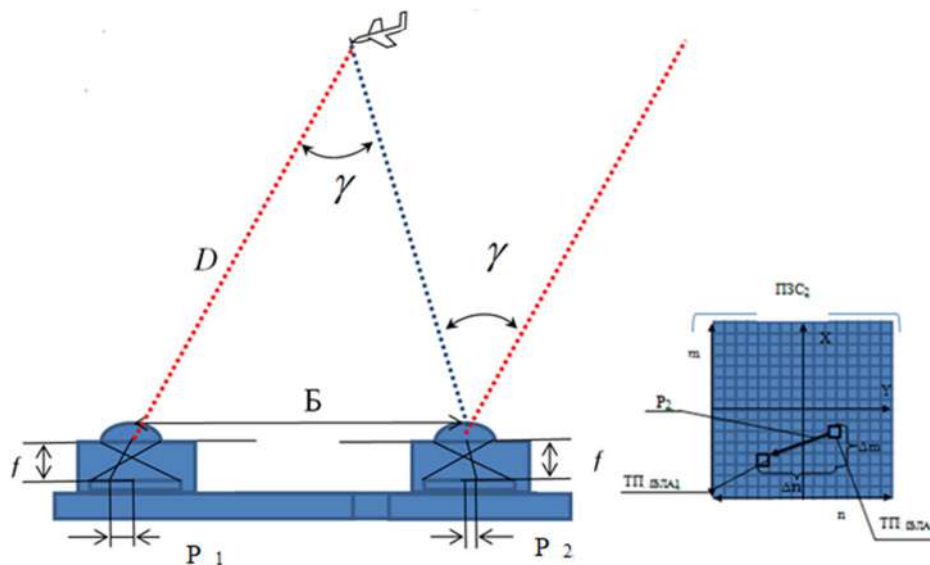


Рис. 2. Стереопары обнаружителей МБЛА

Дальность  $D$  (рис. 2) до МБЛА определяется по величине параллактического угла  $\epsilon_{\text{МБЛА}}$  выражением  $\gamma = P2/f$  и по величине базы между датчиками  $B$ .

Используя определенные координаты телевизионных датчиков или оптико-электронного устройства (ОЭС) и углы направления  $\gamma_{\text{МБЛА}}$ , ЭВМ рассчитывает пространственные координаты МБЛА в оптическом диапазоне электромагнитных волн (рис. 3). Определяя постоянно пространственные координаты МБЛА, ЭВМ определяет скорость и направление движения, что позволяет производить сопровождение МБЛА. Информация о координатах ОЭС определяется в автоматическом режиме и поступает с датчика топопривязки или введенных данных в ручном режиме, полученных с топографических карт (например,  $X_{\text{ОЭС}}$ ,  $Y_{\text{ОЭС}}$ ,  $Z_{\text{ОЭС}}$ ) (рис. 3).

Дальность до МБЛА  $D_1$ , определяемая углами  $\alpha_{\text{МБЛА}}$  и  $\epsilon_{\text{МБЛА}}$  с ОЭС, расположенной на нем, рассчитываются по пространственным координатам  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  и  $\Delta Z$ , при этом они являются приращениями. Их значения определяются следующим образом [3]:

$$X_{\text{МБЛА}} = X_{\text{ОЭС}} + \Delta X = X_{\text{ОЭС}} + D \cos(\alpha_{\text{МБЛА}}); \quad (2)$$

$$Y_{\text{МБЛА}} = Y_{\text{ОЭС}} + \Delta Y = Y_{\text{ОЭС}} + D \sin(\alpha_{\text{МБЛА}}); \quad (3)$$

$$Z_{\text{МБЛА}} = Z_{\text{ОЭС}} + \Delta Z = Z_{\text{ОЭС}} + D \sin(\epsilon_{\text{МБЛА}}). \quad (4)$$

Угол по азимуту  $\alpha_{\text{МБЛА}}$  рассчитывается по размерам параллактического смещения от нулевого значения, угол места цели  $\epsilon_{\text{МБЛА}}$  рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{\text{МБЛА}} = 45^\circ \pm \gamma, \quad (5)$$

где угол  $\gamma$  определяется исходя из величины линейного параллакса и расстояния между смещенными оптическими осями объективов телевизионных датчиков, регистрирующих опорное и соответствующее сравниваемое изображение (рис. 3).

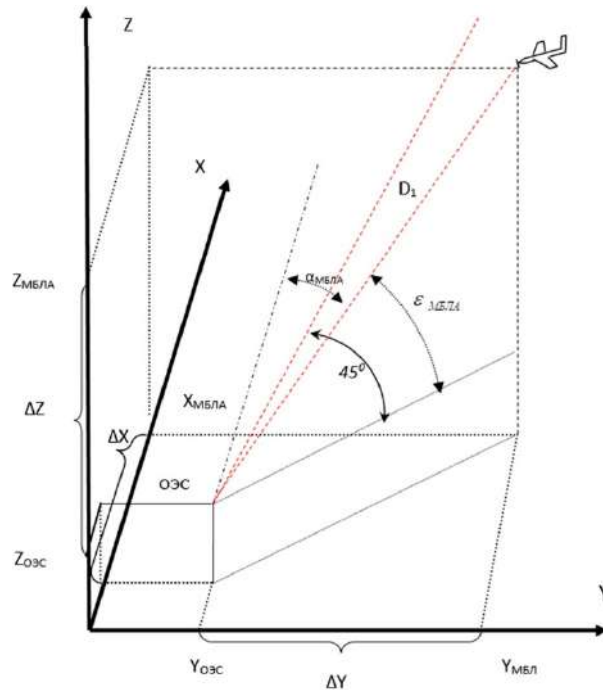


Рис. 3. Схема определения дальности и пространственных координат МБЛА

### Система управления комплексными методами противодействия МБЛА

Для построения информационного поля необходимо использовать систему управления комплексными методами противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам.

Система управления комплексными методами противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам основана на использовании систем обнаружения и поражения. К системе обнаружения относятся средства обнаружения и прицеливания, выполненные на трех и более пространственно разнесенных точках на гиросtabilизирующих платформах, связанных между собой рабочими базами, автоматически определяющими расстояния между собой и свои пространственные координаты. Это позволяет разместить их как на подвижных, так и на стационарных объектах. На каждой базе размещены датчики, работающие в оптическом, акустическом диапазонах, и датчики, работающие в настраиваемых радиолокационных диапазонах электромагнитных волн. Управление работой и обработкой полученной информации осуществляет ЭВМ с элементами искусственного интеллекта. ЭВМ выбирает датчики для более точного обнаружения и определения пространственных координат МБЛА в различных условиях ведения наблюдения, строит объемное 3D-изображение МБЛА и сравнивает его с запрограммированными МБЛА для их распознавания и прицеливания. Система поражения по рассчитанным пространственным координатам МБЛА и гиросtabilизированной боевой части пакета направляющих с кассетным зарядом, используя механизмы наведения в точку упреждения, запускает таймеры настраиваемых детонаторов ракеты, производит контроль поражения МБЛА [5].

Для подвижного информационного поля наиболее близким прототипом является комплекс борьбы с беспилотными летательными аппаратами, который размещается на подвижном объекте с защитой [6].

Комплекс борьбы с МБЛА включает в себя подвижную башню 1, размещенную на базовом шасси 2, систему кругового обзора и прицеливания 3, использование которой осуществляется на основе параллельной работы оптических, радиолокационных и акустических датчиков. Также на башне 1 размещены пусковые установки с ракетами 4, артиллерийская система 5, гранатометы 6,

съемные контейнеры с МБЛА и роботизированными многофункциональными наземными платформами (РМНП) 7, а для радиотехнического подавления МБЛА на башне размещена станция подавления 8 (рис. 4).

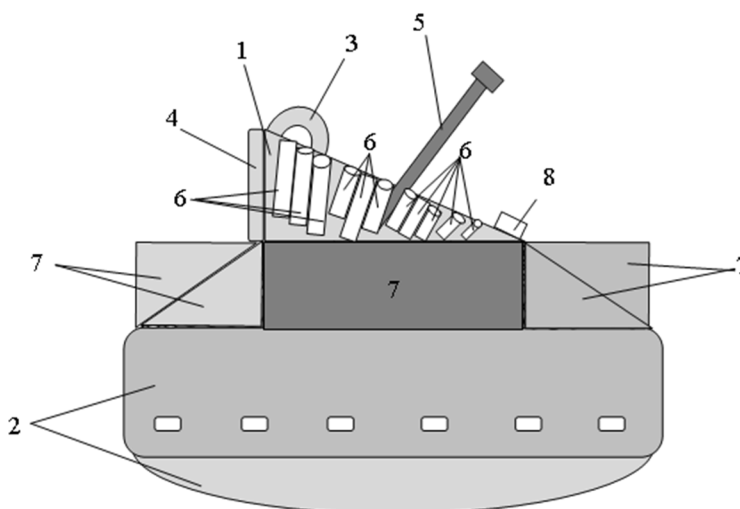


Рис. 4. Комплекс борьбы с МБЛА в походном варианте:

- 1 – подвижная башня; 2 – базовое шасси; 3 – система кругового обзора и прицеливания;  
4 – пусковые установки с ракетами; 5 – артиллерийская система; 6 – гранатометы;  
7 – съемные контейнеры с МБЛА и РМНП; 8 – станция подавления МБЛА

Комплекс борьбы с МБЛА предназначен для прикрытия тактического звена при ведении боевых действий и охраны важных объектов. Для уменьшения времени развертывания комплекса в рабочее положение съемные контейнеры разворачиваются как на месте, так и в движении, при этом открывают защитную гранатометную систему 9. Размещение направляющих гранатометов позволяет обеспечить круговую оборону на  $360^\circ$  по азимуту и  $90^\circ$  по углу места (ближайшую полусферу обороны).

МБЛА самолетного типа 10, МБЛА мультикоптерного типа 11 и РМНП 12, в количестве от шести и более комплектов, крепятся к съемным контейнерам изнутри (рис. 5) и после развертывания приводятся в движение на основе заложенных программ в процессоры.

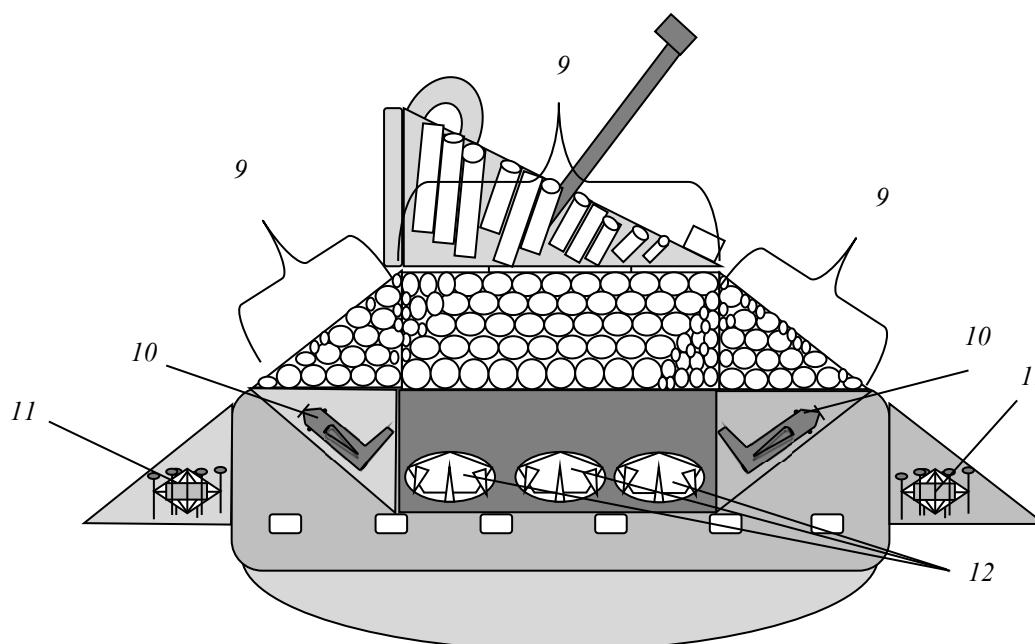


Рис. 5. Комплекс борьбы с МБЛА в развернутом виде:

- 9 – гранатометная система поражения МБЛА ближнего радиуса действия;  
10 – МБЛА-истребители самолетного типа; 11 – МБЛА мультикоптерного типа; 12 – РМНП

Связь между воздушными платформами МБЛА самолетного типа, МБЛА мультикоптерного типа, РМНП и базовым шасси поддерживается в многоканальном режиме оптическим и радиоканалом, резервный – проводной – используется в стационарных условиях и мегаполисах или населенных пунктах. Базовое шасси оборудовано аппаратурой, которая позволяет поддерживать связь с другими средствами автоматизированных систем управления для получения, передачи команд и обстановки по содержанию информационного поля в реальном масштабе времени (рис. 5).

Комплекс борьбы с МБЛА создает информационное поле не только системой кругового обзора и прицеливания, размещенной на подвижной башне, но и воздушными платформами в виде МБЛА самолетного типа 10, МБЛА мультикоптерного типа 11 и наземными платформами РМНП 12. Использование различных платформ позволяет осуществлять обнаружение и противодействие МБЛА в сложных рельефах местности и населенных пунктах.

Воздушные и наземные платформы автоматически определяют расстояния между собой и свои пространственные координаты, что позволяет определять пространственные координаты МБЛА 13 (рис. 6).

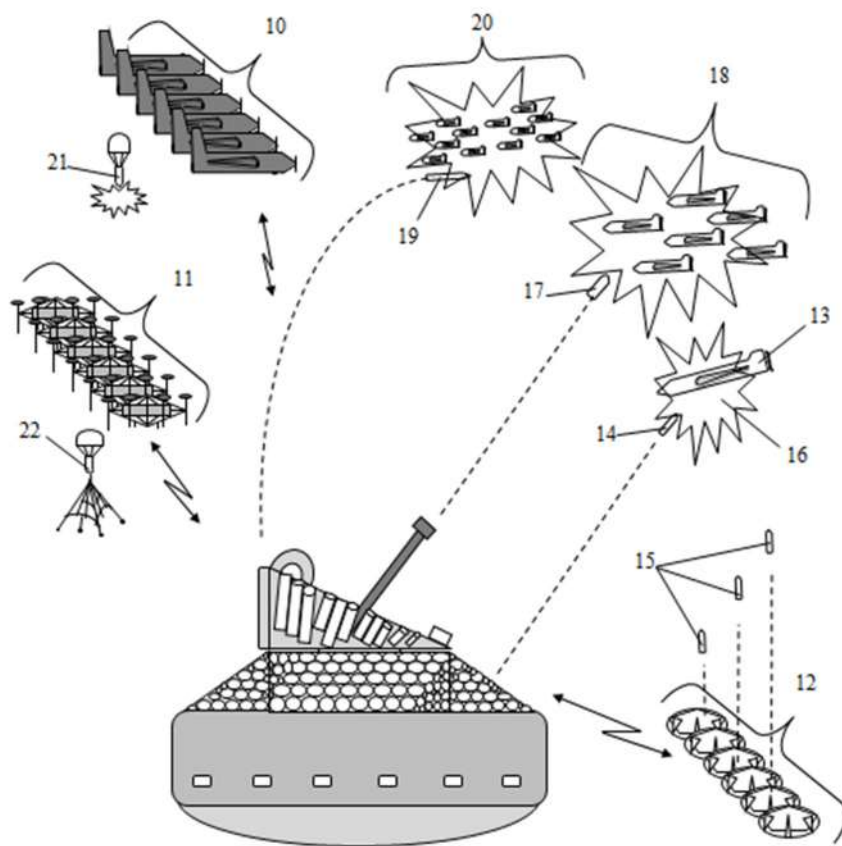


Рис. 6. Комплекс борьбы с МБЛА в боевом варианте:

- 10 – МБЛА-истребители самолетного типа; 11 – МБЛА мультикоптерного типа; 12 – РМНП;  
13 – МБЛА противника; 14 – граната, отстреленная системой гранатометов; 15 – гранаты, отстреленные РМНП; 16 – область подрыва гранаты и поражение МБЛА противника; 17 – управляемый по лучу лазера снаряд; 18 – область подрыва снаряда и поражение нескольких МБЛА противника; 19 – ракета;  
20 – область подрыва ракеты и поражение группы МБЛА противника; 21 – средства подавления и поражения МБЛА противника; 22 – средства захвата МБЛА противника

На каждой платформе размещено по несколько датчиков, работающих в оптическом, акустическом диапазонах, и датчики, работающие в разных настраиваемых радиолокационных диапазонах электромагнитных волн.

Управление работой и обработкой полученной информации осуществляется ЭВМ с элементами искусственного интеллекта, который сам выбирает наиболее эффективные датчики для более точного обнаружения и определения пространственных координат МБЛА и прицеливания устройств

поражения в различных условиях их применения. Рассчитанные пространственные координаты по лазерному или радиоканалу, или по проводному-резервному передаются на ближайшие к МБЛА 13 устройства их подавления, захвата или поражения.

Комплекс борьбы с МБЛА работает в следующей последовательности: одновременно регистрируя кадры видеопоследовательности и определения геометрических и цветовых изменений сформированных изображений [6], согласно изобретению контрольное (наиболее ярковыраженное) и сравниваемые цифровые изображения регистрируют одновременно для каждого фрагмента изображений тремя и более идентичными видеосистемами (датчиками) на основе многоэлементных высокоскоростных фотоприемников. Анализ изображений проводится на ЭВМ, использование трех и более приемных устройств позволяет определять достоверные трехмерные объемные изображения МБЛА. Для наиболее достоверного обнаружения и распознавания МБЛА в условиях плохой видимости, когда оптический канал по выбору ЭВМ не эффективно использовать (густой туман, полная темнота и т.д.), в процессе обнаружения используется звуковой или радиолокационный каналы. Датчики размещены совместно на воздушных и наземных платформах и параллельно фиксируют появление объекта, и также с помощью ЭВМ определяют пространственные координаты МБЛА 13 в звуковом и радиолокационном диапазонах электромагнитных волн. Определяя постоянно пространственные координаты, ЭВМ вычисляет скорость и направление движения, что позволяет производить сопровождение МБЛА и прицеливание в общем информационном поле зоны ответственности комплекса борьбы с МБЛА (рис. 7).

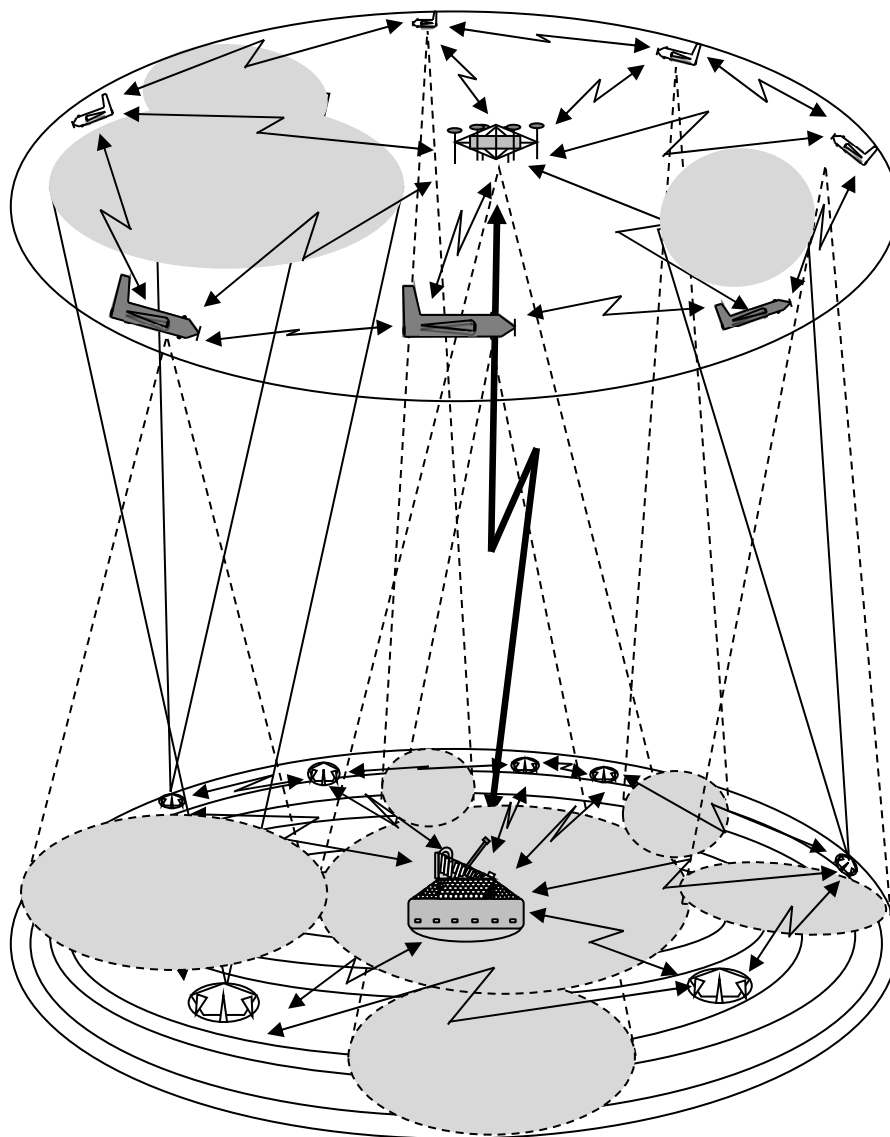


Рис. 7. Вариант построения информационного поля

Для использования разработанного комплекса борьбы с МБЛА и возможности построения им информационного поля их обнаружения необходимо применить унифицированные автомобильные базовые шасси и реализовать модульный принцип применения технических средств расстановки датчиков в пространстве.

### Результаты

Информационное поле обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в пространстве на основе нейронных сетей позволит осуществлять контроль воздействия средств борьбы с МБЛА и корректировку выбора наиболее эффективного средства борьбы с ними в различных условиях. К различным условиям относятся: скрытая работа комплексов обнаружения и борьбы, средства радиоэлектронной борьбы и активные воздействия МБЛА и противодействия им, а также сложный рельеф, населенные пункты с разной этажностью и т.п. Процесс изменения размещения обнаружителей МБЛА в пространстве производится перестроением обнаружителей в наиболее эффективное место на основе использования ИНС. Эти мероприятия необходимы для повышения вероятности обнаружения МБЛА и точного определения их пространственных координат для своевременного принятия верных решений.

### Список литературы

1. Шишков С. В., Чернов Е. А., Исаев Э. К. Анализ современных систем распознавания целей с использованием нейронных сетей // Радиопромышленность. 2011. Вып. 4. Перспективы построения АСУ специального назначения. С. 58–67.
2. Годунов А. И., Шишков С. В., Балаян С. Т., Аль Сафтли Ф. Х. Разработка алгоритма оптимизации обучения нейронной сети при определении количества нейронов в скрытом слое в целях повышения вероятности распознавания образов наземной цели // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 106–118.
3. Шишков С. В. Устройство пеленгации и определение координат беспилотных летательных аппаратов // Радиопромышленность. 2011. Вып. 4. Перспективы построения АСУ специального назначения. С. 103–109.
4. Пат. 2645549 Российская Федерация. МПК F41H 11/02, G01S 55/00. Способ определения координат летательных аппаратов на основе использования двух дирекционных углов и одного угла места / Искоркин Д. В., Шишков С. В., Терешин А. В., Музауи К., Молостров А. В., Синяев Е. Г. № 2015114888 ; заявл. 20.04.2015 ; опубл. 21.02.2018, Бюл. № 6.
5. Пат. 2578524 Российская Федерация. МПК F41H 11/02. Система управления комплексными методами борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами / Шишков С. В. № 2014107032 ; заявл. 25.02.2014 ; опубл. 27.08.2016, Бюл. № 24.
6. Пат. 2700107 Российская Федерация. МПК F41H 11/02; G01S 13/86. Комплекс борьбы с беспилотными летательными аппаратами / Шишков С. В., Барсуков В. А., Лысенко Е. Н., Колесников И. Б., Дорошев А. А., Синяев Е. Г., Петренко В. И., Борщин Ю. Н., Дюндяев А. В., Кутыменев А. В., Пашинян Д. Б., Немов О. Н., Устинов Е. М., Кудрявцев П. Ю. № 2017109351 ; заявл. 24.10.2018 ; опубл. 12.09.2019, Бюл. № 26.
7. Годунов А. И., Куканов С. А., Суздальцев П. С., Мухамбетов А. М. Математическая модель системы управления квадрокоптером // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 25–31.
8. Ошкин А. А., Филиппов Д. Ф., Годунов А. И. Методика оценки эксплуатационной безопасности боеприпасов с малочувствительными к внешним тепловым воздействиям взрывчатыми составами // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 81–87.

### References

1. Shishkov S.V., Chernov E.A., Isaev E.K. Analysis of modern target recognition systems using neural networks. *Radiopromyshlennost' = Radio industry*. 2011;(4):58–67. (In Russ.)
2. Godunov A.I., Shishkov S.V., Balanyan S.T., Al' Saftli F.Kh. Development of an algorithm for optimizing neural network learning when determining the number of neurons in a hidden layer in order to increase the probability of recognizing images of a ground target. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):106–118. (In Russ.)
3. Shishkov S.V. Direction finding device and determination of coordinates of unmanned aerial vehicles. *Radiopromyshlennost' = Radio industry*. 2011:103–109. (In Russ.)
4. Patent 2645549 Russian Federation. MPK F41H 11/02, G01S 55/00. *Sposob opredeleniya koordinat letatel'nykh apparatov na osnove ispol'zovaniya dvukh direktsionnykh uglov i odnogo ugla mesta = A method for determining the coordinates of aircraft based on the use of two directional angles and one location angle*. Iskorkin D.V., Shishkov S.V., Tereshin A.V., Muzauy K., Molostvov A.V., Sinyayev E.G. № 2015114888; appl. 20.04.2015; publ. 21.02.2018, Bull. № 6. (In Russ.)

5. Patent 2578524 Russian Federation. MPK F41H 11/02. *Sistema upravleniya kompleksnymi metodami bor'by s malogabaritnymi bespilotnymi letatel'nyimi apparatami* = *Control system for complex methods of combating small-sized unmanned aerial vehicles*. Shishkov S.V. № 2014107032; appl. 25.02.2014; publ. 27.08.2016, Bull. № 24. (In Russ.)
6. Patent 2700107 Russian Federation. MPK F41H 11/02; G01S 13/86. *Kompleks bor'by s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami* = *Complex for combating unmanned aerial vehicles*. Shishkov S.V., Barsukov V.A., Lysenko E.N., Kolesnikov I.B., Doroshev A.A., Sinyaev E.G., Petrenko V.I., Borshchin Yu.N., Dyun'dyaev A.V., Kut'menev A.V., Pashinyan D.B., Nemov O.N., Ustinov E.M., Kudryavtsev P.Yu. № 2017109351; appl. 24.10.2018; publ. 12.09.2019, Bull. № 26. (In Russ.)
7. Godunov A.I., Kukanov S.A., Suzdal'tsev P.S., Mukhambetov A.M. Mathematical model of a quadcopter control system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = *Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):25–31. (In Russ.)
8. Oshkin A.A., Filippov D.F., Godunov A.I. Methodology for assessing the operational safety of ammunition with explosives that are insensitive to external thermal effects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = *Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):81–87. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Анатолий Иванович Годунов

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

#### Михаил Владимирович Ерофеев

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

#### Антон Иванович Мельничук

аспирант, инженер группы регламента  
и ремонта радиоэлектронной аппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: pelmenio@mail.ru

#### Ербол Токтамысович Ескибаев

магистр, начальник кафедры тактики авиации,  
Военный институт сил воздушной обороны  
(Казахстан, г. Актобе, пр-т Алии Молдагуловой, 39А)  
E-mail: erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru

#### Асылбек Маратович Мухамбетов

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

#### Anatoly I. Godunov

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

#### Mikhail V. Erofeev

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

#### Anton I. Melnichuk

Postgraduate student, engineer of the radio electronic  
equipment regulation and repair group,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Erbol T. Eskibaev

Master degree student,  
head of the sub-department of tactics of aviation,  
Military Institute of Air Defense Forces  
(39A Aliya Moldagulova avenue,  
Aktobe, Kazakhstan)

#### Asylbek M. Mukhambetov

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 10.08.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 02.09.2024**

**Принята к публикации/Accepted 16.09.2024**

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ПРОКЛАДКИ ЛУПИНГА В НАКЛОННЫЙ ГАЗОПРОВОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ

Р. А. Штыков<sup>1</sup>, А. В. Алексеев<sup>2</sup>, Н. К. Юрков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Муромский институт Владимирского государственного университета, Муром, Россия

<sup>2</sup> Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

<sup>3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> ipmrroman@yandex.ru, <sup>2</sup> antonvladim@mail.ru, <sup>3</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Формулы гидравлического расчета стационарного газодинамического состояния газопровода и газопроводной сети построены только с учетом сопротивления трению. Но не менее важным также считается учитывать различные уклоны трассы, которые способствуют изменению распределения давления в разных направлениях. В данной статье выводятся гидравлические формулы для движения сжимаемой среды по наклонному трубопроводу при различных режимах течения сжимаемой среды. Эти формулы будут использованы при решении задачи об оптимальной прокладке лупинга газовых сетей. *Материалы и методы.* Исследуются гидравлические закономерности лупинга системы газоснабжения, которые способствуют установлению оптимальных характеристик течения газа. *Результаты.* Получены гидравлические закономерности, которые обобщают задачу об оптимальной прокладке лупинга для рельефного газопровода, определен характер изменения давления, пропускной и аккумулирующей способностей участка с лупингом, выделены целесообразные варианты прокладки лупинга, которые согласуются со случаем уклонной трассы. *Выводы.* В зависимости от линейного уклона трассы газопровода выделены условия возрастания, постоянства и убывания значения давления вдоль по потоку и объяснены причины их возникновения.

**Ключевые слова:** газопровод, газ, управление, оптимизация, лупинг, уклон

**Для цитирования:** Штыков Р. А., Алексеев А. В., Юрков Н. К. Оптимизация оценки прокладки лупинга в наклонный газопровод при различных режимах течения // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 15–20. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-2

## OPTIMIZATION OF THE EVALUATION OF THE LUPING INSTALLATION IN AN INCLINED GAS PIPELINE UNDER VARIOUS FLOW CONDITIONS

R.A. Shtykov<sup>1</sup>, A.V. Alekseev<sup>2</sup>, N.K. Yurkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia

<sup>2</sup> Volga Region State Transport University, Samara, Russia

<sup>3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> ipmrroman@yandex.ru, <sup>2</sup> antonvladim@mail.ru, <sup>3</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The formulas for the hydraulic calculation of the stationary gas dynamic state of the gas pipeline and the gas pipeline network are constructed only taking into account the friction resistance. But it is also considered important to take into account the different slopes of the route that contribute to a change in the pressure distribution in different directions. In this article, hydraulic formulas are derived for the movement of a compressible medium along an inclined pipeline under various flow regimes of the compressible medium. These formulas will be used to solve the problem of optimal looping of gas networks. *Materials and methods.* Investigation of hydraulic patterns of looping of the gas supply system, which contribute to the establishment of optimal gas flow characteristics. *Results.* Hydraulic patterns have been obtained that generalize the problem of optimal looping wiring for relief, the nature of pressure changes, throughput and storage capacities of the looping section has been determined, and appropriate options for laying looping have been identified, which are consistent with the case of an inclined route. *Conclusions.* Depending on the linear slope of the pipeline route, the conditions of increasing, constant and decreasing pressure values along the stream are highlighted and the reasons for their occurrence are explained.

**Keywords:** gas pipeline, gas, management, optimization, looping, slope

**For citation:** Shtykov R.A., Alekseev A.V., Yurkov N.K. Optimization of the evaluation of the luping installation in an inclined gas pipeline under various flow conditions. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):15–20. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-2

Формулы гидравлического расчета стационарного газодинамического состояния газопровода и газопроводной сети построены только с учетом сопротивления трению [1]. Тем не менее положительный и отрицательный уклоны трассы способствуют изменению распределения давления в разных направлениях. В данной статье выводятся гидравлические формулы для движения сжимаемой среды по наклонному трубопроводу при различных режимах течения сжимаемой среды. Эти формулы будут использованы при решении задачи об оптимальной прокладке лупинга. Известно, что лупинг, согласно работам [2, 3], предназначен для увеличения пропускной способности и надежности элементарного участка газопровода и газопроводной сети в целом. Постараемся оценить лупинг всесторонне.

Обратимся к системе уравнений (1), так как наличие замкнутого контура в системе обуславливает использование аналогов законов Кирхгофа, которые записываются в этом виде

$$\begin{cases} \frac{dp}{\rho} + g dy + \frac{\lambda w^2}{2} \frac{dx}{D} = 0; \\ M = \rho w F = \text{const}, \quad p = Z \rho R T, \end{cases} \quad (1)$$

где  $M$ ,  $T$ ,  $R$ ,  $Z$ ,  $F = \pi D^2 / 4$  и  $g$  полагаются постоянными. (В гидравлических расчетах допускается использование постоянного значения  $Z$ , которое определяется через средние значения давления и температуры газа в элементарном участке трубопровода.)

Сила инерции в уравнении сохранения импульса из формулы (1) не учтена как в силу ее незначительности при  $p \gg p_{\text{атм}}$ , так и в силу получаемого неявного решения, что усложняет анализ результатов.

Рассматривается участок с длиной  $L$ , диаметром  $D$  и эквивалентной шероховатостью  $k$ . В начале участка давление газа имеет значение  $p_A$ . Массовый расход газа постоянен и составляет  $M$ . Сначала определяется значение давления в конце участка для одиночного трубопровода и в случае наличия лупинга, а далее эти показатели сравниваются.

Используя обобщенную формулу Лейбензона для коэффициента сопротивления [4, 5] для пяти режимов течения и исключив  $\rho$  и  $w$  из формулы (1), получим обыкновенное дифференциальное уравнение относительно давления

$$\frac{dp^{2+n}}{dx} + a p^{2+n} = -\Lambda. \quad (2)$$

Здесь использованы обозначения постоянных

$$a = (2+n) \frac{g \sin \alpha}{ZRT}, \quad \Lambda = (2+n) \frac{\xi ZRT M^{2+n}}{2DF^2}, \quad \xi = \varsigma \frac{k^\theta (4ZRT)^n}{(\pi v)^n D^{\theta+n}}.$$

Изменение давления по длине газопровода подчиняется закону

$$p^{2+n}(x) = p_A^{2+n} e^{-ax} + \frac{\Lambda}{a} (e^{-ax} - 1). \quad (3)$$

В конце расчетного участка для одиночного провода значение давления составляет

$$\tilde{p}_E^{2+n} = p_A^{2+n} e^{-aL} + \frac{\Lambda}{a} (e^{-aL} - 1).$$

Переходим к расчету участка с лупингом. Задача об оптимальной прокладке лупинга в горизонтальном газопроводе и при развитом турбулентном режиме течения рассмотрена в работе [6]. В обсуждаемом случае задача усложнена тем, что учитывается уклон трассы, а режим течения – произвольный. Для наглядности принято, что длина лупинга составляет половину основного канала (т.е.  $L/2$ ), а остальные гидравлические характеристики основного и вспомогательного каналов одинаковые (рис. 1).

Полагаем, что лупингованный участок начинается с расстояния  $l$  от начала основного участка. Так как лупинг и основной канал имеют одинаковые характеристики, то исходный расход газа  $M$  между параллельными каналами распределяется по равным частям  $M/2$ .

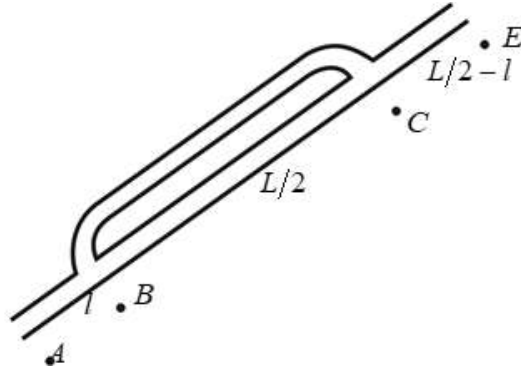


Рис. 1. Оценка целесообразности прокладки лупинга

С привлечением решения (3) и аналогов закона Кирхгофа рассчитываются значения давления в точках  $B$ ,  $C$  и  $E$ :

$$\begin{aligned} p_B^{2+n} &= p_A^{2+n} e^{-al} + \frac{\Lambda}{a} (e^{-al} - 1), \\ p_C^{2+n} &= p_B^{2+n} e^{-aL/2} + \frac{\Lambda}{2^{2+n} a} (e^{-aL/2} - 1), \\ p_E^{2+n} &= p_C^{2+n} e^{-a(L/2-l)} + \frac{\Lambda}{a} (e^{-a(L/2-l)} - 1). \end{aligned}$$

Исключив промежуточные значения давления, получим

$$p_E^{2+n} = \tilde{p}_E^{2+n} + \phi, \quad (4)$$

где

$$\phi = \frac{(2^{2+n} - 1)\Lambda}{2^{2+n} a} e^{-a(L-l)} (e^{aL/2} - 1).$$

Так как при произвольном уклоне  $\sin \alpha$  поправка  $\phi$  имеет положительное значение, то проводка лупинга способствует увеличению значения  $p_E$  давления в конце участка и меньшей трате энергии на транспортировку газа. Увеличение значения  $l$ , согласно оценке

$$\frac{\partial p_E}{\partial l} \sim e^{-a(L-l)} (e^{aL/2} - 1),$$

приводит к увеличению значения  $p_E$  для трассы с подъемом и уменьшению его значения – для трассы со спуском. Но во втором случае значение  $p_E$  ограничено снизу  $\tilde{p}_E$ . Таким образом, с точки зрения экономии энергии на компримирование газа при положительном уклоне трассы целесообразно установить лупинг в начале участка, а при отрицательном уклоне – в конце.

Для горизонтального газопровода ( $a \rightarrow 0$ ) значение давления в точке  $E$  не зависит от местоположения точки  $B$  и составляет для наличия лупинга:

$$p_E^{2+n} = p_A^{2+n} - \Lambda L \frac{2^{3+n} - 2^{2+n} + 1}{2^{3+n}},$$

а при отсутствии лупинга:

$$\tilde{p}_E^{2+n} = p_A^{2+n} - \Lambda L.$$

Соответствующие развитому турбулентному режиму течения формулы ( $n = 0$ ;  $\varsigma = 0,11$ ;  $\theta = 0,25$ )

$$p_E^2 = p_A^2 - 5\Lambda L / 8 \text{ и } \tilde{p}_E^2 = p_A^2 - \Lambda L.$$

Из формулы (4) при известных значениях давления  $p_A$  и  $p_E$  в концах участка можно определить пропускную способность рассматриваемого участка [7]

$$\tilde{M} = \left( \frac{2DF^2}{(2+n)\xi ZRT} \frac{\tilde{p}_E^{2+n} - p_A^{2+n} e^{-aL}}{e^{-aL} - 1} \right)^{1/(2+n)}. \quad (5)$$

Положительное значение второго множителя в скобке соответствует осуществимым режимам функционирования элементарного участка. Аналогичную (5) формулу можно получить и из выражения (4) для случая наличия лупинга. Сравнение этих двух формул приводит к зависимости

$$\psi = \left( \frac{M}{\tilde{M}} \right)^{2+n} = \frac{1}{1 + \frac{2^{2+n} - 1}{2^{2+n}} e^{-a(L-l)} \frac{e^{aL/2} - 1}{e^{-aL} - 1}}.$$

При  $a > 0$  имеет место условие  $\psi > 1$ , т.е. для трубы с подъемом прокладка лупинга приводит к увеличению пропускной способности участка.

Аналогичная картина наблюдается для горизонтальной трубы, т.е. при  $(a \rightarrow 0)$ . Раскрытие  $\psi$  по правилу Лопиталья показывает, что при проводке лупинга пропускная способность участка увеличивается в  $\left( \frac{2^{3+n}}{2^{3+n} - 2^{2+n} + 1} \right)^{1/(2+n)}$  раз. В развитом турбулентном режиме течения этот показатель равняется  $\sqrt{8/5}$ .

Анализом установлено, что прокладка лупинга в участок с отрицательным уклоном ( $\sin \alpha < 0$ ) также приводит к увеличению пропускной способности участка ( $\psi < 1$ ).

Чтобы определить целесообразное расположение лупинга, необходимо оценить  $\frac{\partial M}{\partial l}$ . Учитывая  $\frac{\partial M}{\partial l} \sim \frac{\partial \psi}{\partial l}$ , имеем оценку  $\frac{\partial M}{\partial l} \sim a$ .

Для трассы с подъемом наибольшая пропускная способность достигается при прокладке лупинга в конце участка, а для трассы со спуском – в начале участка. Для горизонтальной трубы местоположение лупинга в рамках задачи не влияет на пропускную способность участка.

Таким образом, прокладка лупинга приводит к увеличению пропускной способности участка для горизонтальной трассы и для случая подъема трассы, а в случае с отрицательным уклоном он дает обратный эффект, что не согласуется с мнением [2] для горизонтальной трубы.

Однозначное преимущество прокладки лупинга проявляется при оценке аккумулирующей способности участка, которая полезна при сглаживании суточной неравномерности добычи и потребления газа.

Согласно постановке задачи при наличии лупинга, аккумулирующая способность элементарного участка с  $\sin \alpha \geq 0$  увеличивается в полтора и более раз, чему способствуют увеличения физического объема участка и среднего по участку значения давления. Такая же оценка имеет место для горизонтального газопровода. Выяснено, что для получения максимальной аккумулирующей способности местоположение лупинга надо определять в конце с наибольшим давлением, т.е. на участках, где имеет место режим после «перевальной точки» ( $dp/dx > 0$ ), лупинг следует установить в конце участка, а в остальных случаях – в начале его.

### Заключение

Таким образом:

– удалось обобщить задачу об оптимальной проводке лупинга для рельефного газопровода и для всех пяти режимов течения;

- определить характер изменения давления, пропускной и аккумулирующей способностей участка с лупингом;
- выделить целесообразные варианты прокладки лупинга, которые не всегда согласуются со случаем горизонтальной трассы.

### Список литературы

1. Чугаев Р. Р. Гидравлика. М. : Энергия, 1970. 672 с.
2. Штыков Р. А. Путевое изменение коэффициента сверхсжимаемости газа на однопоточных и многопоточных участках магистрального газопровода // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 145–148.
3. Штыков Р.А. Разработка численного алгоритма определения гидравлических параметров двух групп параллельных нитей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 1. С. 270–273.
4. Юрков Н. К., Штыков Р. А. Единое компонентное уравнение для сложносоставного горючего газа // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 1. С. 163–165.
5. Штыков Р. А. Процесс изменения коэффициента сверхсжимаемости газа на участках газопровода // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1. С. 56–63.
6. Юрков Н. К., Штыков Р. А. Оптимизация управления транспортировкой газа по трубопроводам путем анализа динамики изменения концентрации примесей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 87–92.
7. Штыков Р. А. Процесс образования круглой турбулентной струи природного и сжиженного газов в диффузионном факеле // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4. С. 85–89.

### References

1. Chugaev R.R. *Gidravlika = Hydraulics*. Moscow: Energiya, 1970:672. (In Russ.)
2. Shtykov R.A. Path change of the gas superconductivity coefficient on single- and multi-threaded sections of the main gas pipeline. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:145–148. (In Russ.)
3. Shtykov R.A. Development of a numerical algorithm for determining the hydraulic parameters of two groups of parallel threads. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;1:270–273. (In Russ.)
4. Yurkov N.K., Shtykov R.A. A single component equation for a compound combustible gas. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;1:163–165. (In Russ.)
5. Shtykov R.A. The process of changing the gas superconductivity coefficient in gas pipeline sections. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(1):56–63. (In Russ.)
6. Yurkov N.K., Shtykov R.A. Optimization of gas transportation control through pipelines by analyzing the dynamics of changes in the concentration of impurities. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):87–92. (In Russ.)
7. Shtykov R.A. The process of formation of a round turbulent jet of natural and liquefied gases in a diffusion flare. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(4):85–89. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Роман Александрович Штыков

кандидат технических наук,  
доцент кафедры физики и прикладной математики,  
Муромский институт Владимирского  
государственного университета  
(Россия, г. Муром, ул. Карла Маркса 11)  
E-mail: ipmrroman@yandex.ru

#### Антон Владимирович Алексеев

кандидат технических наук,  
доцент кафедры механики и инженерной графики,  
Приволжский государственный  
университет путей сообщения  
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В)  
E-mail: antonvladim@mail.ru

#### Roman A. Shtykov

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of physics and applied mathematics,  
Murom Institute of Vladimir State University  
(11 Karl Marks street, Murom, Russia)

#### Anton V. Alekseev

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of mechanics and engineering graphics,  
Volga Region State Transport University  
(2V Svobody street, Samara, Russia)

**Николай Кондратьевич Юрков**

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

**Nikolay K. Yurkov**

Doctor of technical sciences, professor,  
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 18.09.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 14.10.2024**

**Принята к публикации/Accepted 28.10.2024**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОАППАРАТУРЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

М. Е. Данилин<sup>1</sup>, А. В. Заяра<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-производственное объединение «Аванти», Казань, Россия

<sup>2</sup> Военный инновационный технополис «Эра», Анапа, Россия

<sup>1</sup> metod@avgr.tech, <sup>2</sup> zaw1966@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цель.* Современные мобильные робототехнические комплексы оснащаются сложной электроаппаратурой, на долю которой приходится более половины отказов, обусловленных деградационными процессами. В целях идентификации технического состояния электроаппаратуры должен проводиться его мониторинг. *Материалы и методы.* Для решения задачи мониторинга предлагается модель изменения технического состояния, на основе которой с использованием методов нечеткой логической классификации, ядерной оценки плотности и ближайших соседей производится идентификация технического состояния. *Результаты и выводы.* Совершенствование диагностического обеспечения электроаппаратуры для прогнозирования с использованием этой модели позволит permanently идентифицировать техническое состояние.

**Ключевые слова:** мобильные робототехнические комплексы, электроаппаратура, изменение технического состояния, мониторинг, методы нечеткой логической классификации, ядерной оценки плотности и ближайших соседей, вероятностная классификация, расстояние Махаланобиса

**Для цитирования:** Данилин М. Е., Заяра А. В. Моделирование процесса изменения технического состояния электроаппаратуры робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 21–30. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-3

## SIMULATION OF THE PROCESS OF TECHNICAL STATUS OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF ROBOTICS COMPLEXES

M.E. Danilin<sup>1</sup>, A.V. Zayara<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scientific and Production Association "Avanti", Kazan, Russia

<sup>2</sup> Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russia

<sup>1</sup> metod@avgr.tech, <sup>2</sup> zaw1966@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Modern mobile robotics systems are equipped with complex electrical equipment, which accounts for more than half of failures due to degradation processes. The electrical equipment shall be monitored to identify its technical status. *Materials and methods.* To perform the monitoring tasks, a model of technical status change is proposed, on the basis of which an identification of the technical status is made using methods of unclear logical classification, nuclear density assessment and immediate neighbors. *Results and conclusions.* The improvement of diagnostic equipment in the area of forecasting using this model will permanently identify the technical status.

**Keywords:** mobile robotic complexes, electrical equipment, change in technical condition, monitoring, methods of fuzzy logical classification, nuclear density estimation and nearest neighbors, probabilistic classification, Mahalanobis distance

**For citation:** Danilin M.E., Zayara A.V. Simulation of the process of technical status of electrical equipment of robotics complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(4):21–30. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-3

### Введение

Расширение функциональных возможностей современных мобильных робототехнических комплексов (РТК) осуществляется за счет усложнения электроаппаратуры, на долю которой приходится большая часть неизбежных отказов. Восстановление ее работоспособности требует значительных

трудозатрат и высокой квалификации специалистов, что уже обосновывает актуальность исследований, направленных на решение задачи диагностирования: определения технического состояния комплекса с заданной вероятностью на предстоящий промежуток времени<sup>1</sup>.

Рассматривая мобильные РТК как принципиально новый вид техники, резонно напрашивается вопрос об обоснованном выборе концепции технического обслуживания и ремонта (ТОиР), на основе которой стало бы возможным создание системы технической эксплуатации. Аргументы в защиту достоинств планово-предупредительной системы до сих пор не опровергнуты, несмотря на наличие альтернативных вариантов.

Противоречие заключается в следующем. Одновременно с выпуском на рынок готовой продукции необходимо предоставлять потребителю средства эксплуатации, посредством которых должны проводиться операции ТОиР. Однозначно можно констатировать, что разработка контрольно-проверочной аппаратуры для сложной электроаппаратуры РТК потребует значительных финансовых и интеллектуальных ресурсов. С целью снижения затрат на создание системы технической эксплуатации РТК предлагается в хорошо зарекомендовавшую себя планово-предупредительную концепцию ТОиР добавить элементы проактивной концепции, теоретические основы которой постулируют, что изначально все отказы присутствуют в зачаточном виде во всех технических системах [1]. Различные факторы (конструкторские, технологические, эксплуатационные) способствуют деградиационным процессам, вызывающим старение электроаппаратуры и приводящим к ее неработоспособному состоянию.

### Материалы и методы

Своевременное распознавание состояния, предшествующего предельному, которое характеризуется совокупностью признаков, свидетельствующих о наступлении постепенного отказа<sup>2</sup>, возможно только за счет мониторинга – процесса непрерывного накопления информации о техническом состоянии с целью его идентификации<sup>3</sup>. В большинстве случаев появлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Благодаря монотонности появляется возможность предупредить появление отказа или принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий. Другими словами, решение задач мониторинга технического состояния направлено на его прогнозирование, которое позволит управлять эксплуатацией такой сложной технической системы, как РТК [2].

Рассматривая мониторинг как составную часть технического диагностирования, дефиниция нормативного документа [3] трактует диагностическую модель как формализованное описание объекта, необходимое для решения задач (в рассматриваемом случае) мониторинга.

Разработка модели основывается на математических методах статистической классификации. С ее помощью становится возможным формализовать процесс изменения технического состояния в виде структурированной совокупности классов работоспособности. Данный подход позволяет учитывать важную особенность: появляется возможность контролировать техническое состояние этого нового вида техники на начальном этапе его эксплуатации в ограниченный промежуток времени. С целью предвидения возникновения и предотвращения отказов в электроаппаратуре робототехнических комплексов предлагается модель, позволяющая решить следующие задачи:

- 1) оценить вероятность принадлежности текущего состояния модели к каждому возможному классу работоспособности;
- 2) разработать математический аппарат расчета метрики для оценивания удаленности текущего состояния от предельного.

При недостаточной информации о состоянии объекта диагностирования для моделирования предлагается применить сочетание методов нечеткой логической классификации и ближайших соседей<sup>4</sup>. Эти методы используют алгоритмы, которые позволяют группировать данные и относить их к определенным классам, основанным на вероятностных характеристиках и статистическом распределении входных параметров. Еще одним важным аспектом является учет неопределенности, который

<sup>1</sup> ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

<sup>3</sup> ГОСТ 34913-2022. Системы технического диагностирования и мониторинга железнодорожной автоматики и телемеханики высокоскоростных железнодорожных линий. Общие технические требования.

<sup>4</sup> ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.

является характерным для статистических методов. Это связано с тем, что в процессе эксплуатации может отсутствовать полная информация о состоянии объекта. Входные данные могут быть зашумленными и рассогласованными, содержать ошибки. Перечисленные методы позволяют учитывать эти факторы, а также использовать вероятностный подход для прогнозирования, что дает возможность принимать более обоснованные решения в условиях неопределенности.

С использованием метода нечеткой логической классификации применительно к электроаппаратуре мобильного РТК для решения задачи мониторинга ее технического состояния разработана процедура оценивания обобщенного, внесистемного параметра «нагруженность», характеризующего уровень энергоэффективности комплекса [4, 5]. Эта величина интегрально оценивает техническое состояние в процессе выполнения комплексом своих функций в интервале значений от 0 до 1 и учитывает энергетические показатели (потребляемый ток и скорость движения), влияющие на безотказность электроаппаратуры. Его текущее значение формируется на основе комплексирования данных о входных величинах: линейной скорости движения и потребляемого тока, получаемых с проприоцептивных датчиков. Для них определены термы: для скорости – низкая, средняя, высокая; для тока – слабый, средний, большой. Комплексирование осуществляется с использованием нечеткого логического вывода на основе импликации Мамдани. Центральным элементом в процедуре нечеткого вывода является база правил, которая содержит информацию о структуре модели. В базе каждому сочетанию термов входных величин соответствует свой терм нагруженности. Пример такой базы представлен в табл. 1.

Таблица 1

База правил модели нечеткого логического вывода

| Входные величины                   |                          | Уровень нагруженности $Q(t)$ |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Величина потребляемого тока $I(t)$ | Скорость движения $v(t)$ |                              |
| Слабый                             | Низкая                   | Легкий                       |
| Слабый                             | Средняя                  | Легкий                       |
| Слабый                             | Высокая                  | Д                            |
| Средний                            | Низкая                   | Тяжелый                      |
| Средний                            | Средняя                  | Умеренный                    |
| Средний                            | Высокая                  | Д                            |
| Большой                            | Низкая                   | Критический                  |
| Большой                            | Средняя                  | Тяжелый                      |
| Большой                            | Высокая                  | Умеренный                    |

Из базы исключается сочетание «высокая скорость» и «слабое значение потребляемого тока», как противоречащее закону сохранения энергии. Сочетанию термов «низкая скорость» и «большой ток» сопоставляется «предельное состояние» или, по крайней мере, близкое к предельному. Именно такое сочетание свидетельствует о появлении и развитии в электроаппаратуре постепенного отказа.

Базу данных в виде таблицы с информацией о скорости и потребляемом токе предлагается преобразовать в координатную плоскость, на которой по оси абсцисс откладывается скорость, а по оси ординат – потребляемый ток. Плоскость разделена на прямоугольники, границы которых определяют диапазоны для термов.

Для рассматриваемого случая класс работоспособности трактуется как параметрическая категория, которой может соответствовать текущее состояние электроаппаратуры мобильного РТК в пространстве, созданном путем трансформации базы правил входных величин (если входных величин две, то на плоскости) и характеризующимся определенным сочетанием термов входных величин (скорости движения  $v(t)$  и потребляемого тока  $I(t)$ )<sup>1</sup>. Каждый класс работоспособности помечается персональным маркером в виде определенного интервала нагруженности. Например, сочетанию «низкая скорость – слабый ток» соответствует легкий уровень  $0 < Q(t) \leq 0,25$ . Другой прямоугольник с сочетанием «низкая скорость» и «большой ток» отмечается как критический уровень нагруженности ( $0,95 \leq Q(t) \leq 1$ ), который с определенным значением апостериорной вероятности может оповещать о приближении предельного состояния электроаппаратуры. Пример плоскости классов состояний представлен в табл. 2.

<sup>1</sup> ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.

Таблица 2

Классы состояний  $R$  электроаппаратуры мобильного РТК

| Потребляемый ток $I$ , А | Скорость движения $V$ , м/с |           |           |
|--------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|
|                          | низкая                      | средняя   | высокая   |
| слабый                   | легкий                      | легкий    | д         |
| средний                  | тяжелый                     | умеренный | д         |
| большой                  | критический                 | тяжелый   | умеренный |

Так как конечной целью моделирования является все-таки распознавание предельного состояния, значения нагруженности  $Q(t) \geq 0,95$  интерпретируются как критическое состояние электроаппаратуры. Каждый такой промежуток времени  $[t_{ai}, t_{bi}]$  (рис. 1) фиксируется. Одновременно отмечаются интервалы значений потребляемого тока  $[I_{ai}, I_{bi}]$  и скорости  $[v_{ai}, v_{bi}]$ .



Рис. 1. График временного ряда нагруженности со значениями перегрузки  $Q(t) \geq 0,95$

По результатам статистической обработки временных рядов скорости движения  $v(t)$  и потребляемого тока  $I(t)$  до момента времени  $t_{bi}$  оцениваются основные параметры законов распределения этих случайных величин (рис. 2). Например, для временного ряда  $I(t)$  подтверждается гипотеза о распределении по нормальному закону.

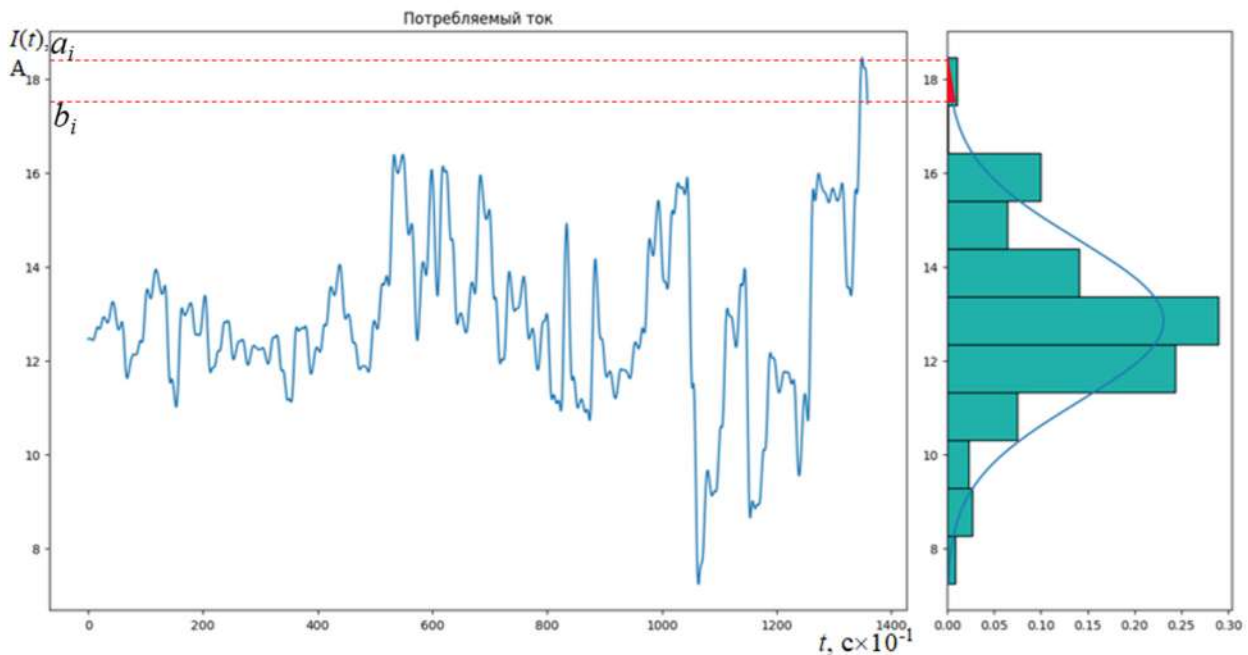


Рис. 2. Оценка распределения случайной величины потребляемого тока  $I(t)$

На основании доказанных гипотез о подтвержденных законах определяется совместное распределение для двух случайных величин:  $v(t)$  и  $I(t)$ . Тот факт, что одна случайная величина является зависимой от другой, значительно усложняет процедуру статистического анализа. Вместо простого

определения плотности совместного распределения как произведения их плотностей совместная плотность вероятности рассчитывается с использованием метода ядерной оценки плотности вероятности для генерации совместного распределения на основе известных законов для этих величин [6, 7].

Применение метода ядерной оценки плотности вероятности для построения поверхности совместного распределения двух зависимых случайных величин (в данном случае, скорости движения  $v(t)$  и потребляемого тока  $I(t)$ ) позволяет корректно и эффективно создавать основу модели изменения технического состояния. Сущность метода ядерной оценки плотности вероятности заключается в том, что он строит совместное распределение путем наложения гладких ядерных функций на каждый наблюдаемый экземпляр данных и суммирования их для получения непрерывной оценки плотности. При этом важным аспектом является выбор ядра (например, гауссовского) и параметра сглаживания (ширины ядра). Корректность применения метода обеспечивается тем, что для зависимых случайных величин учитываются сложные структуры зависимостей между ними. В результате получается более адекватное представление о совместном распределении. Пример плоскости и графика поверхности совместного распределения  $f(I, v)$ , построенного с использованием метода ядерной оценки плотности вероятности, представлен на рис. 3.

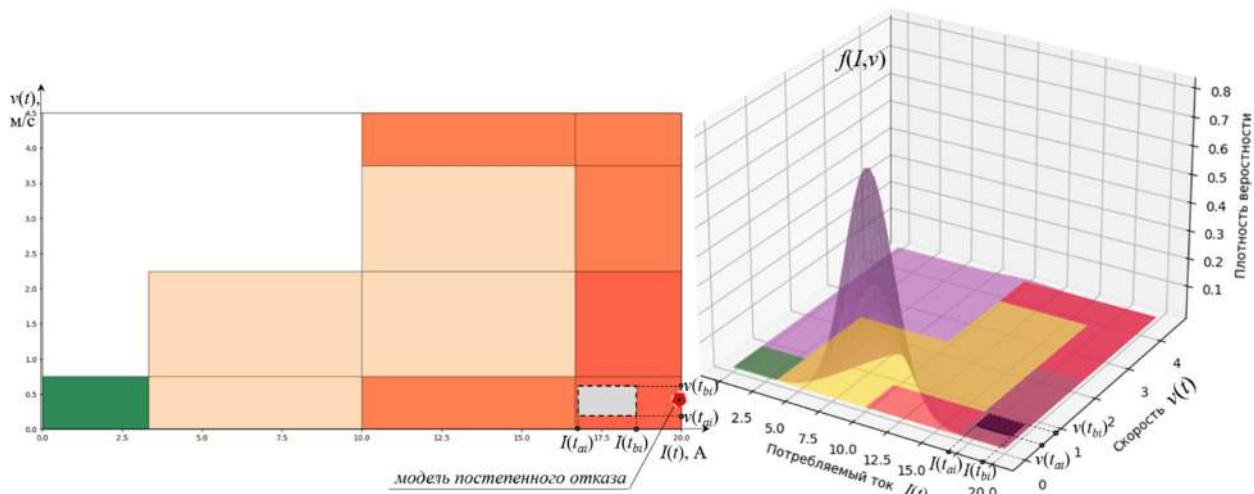


Рис. 3. Пример плоскости классов работоспособности и графика совместной функции плотности вероятности  $f(I, v)$

Важным достоинством метода ядерной оценки плотности вероятности является адаптация совместного распределения к зависимости переменных. Построенная поверхность  $f(I, v)$  методом ядерной оценки плотности вероятности нивелирует проблему независимости для традиционного классификатора «Наивный Байес» [8]. Следовательно, появляется возможность выделить классы (категории работоспособности) в зависимости от непрерывного изменения значения совместной плотности  $f(I, v)$  во времени.

Оценить вероятность принадлежности текущего состояния модели к каждому возможному классу работоспособности с учетом текущих значений  $v(t_i)$  и  $I(t_i)$  возможно с помощью правила Байеса [8]:

$$P(C_R | I, v) = \frac{P(I, v | C_R) P(C_R)}{P(I, v)}, \quad (1)$$

где  $P(I, v | C_R)$  – апостериорная вероятность возникновения критического уровня нагруженности («медленная» скорость при «высоком» значении потребляемого тока) при текущих значениях  $v(t)$  и  $I(t)$ , которые соответствуют интервалам  $[I(t_{ai}), I(t_{bi})]$  и  $[v(t_{ai}), v(t_{bi})]$ . Графическая интерпретация вероятности попадания случайных величин  $v(t)$  и  $I(t)$  в указанные интервалы соответствует объемной фигуре в вероятностном пространстве с основанием в виде прямоугольника с координатами:  $(I(t_{ai}), v(t_{ai}))$ ;  $(I(t_{bi}), v(t_{bi}))$ ;  $(I(t_{bi}), v(t_{ai}))$  и  $(I(t_{ai}), v(t_{bi}))$  (рис. 3, 4). Определяется по формуле

$$P(I, v | C_R) = \iint_{v(t_{ai}), v(t_{bi})}^{I(t_{ai}), I(t_{bi})} f(I, v) dI dv. \quad (2)$$

Высота этой фигуры ограничена значениями совместной функции плотности вероятности  $f(I, v)$  для точек, образующих прямоугольное основание.

$P(C_R)$  – апостериорная вероятность события, что текущее состояние электроаппаратуры принадлежит к классу работоспособности  $R_i$ , соответствующему прямоугольнику на плоскости  $XOY$  со сторонами, соответствующими интервалам значений потребляемого тока  $[I_{Ri}, I_{Ri+1}]$  и скорости  $[v_{Ri}, v_{Ri+1}]$ . Рассчитывается как объем пространственной фигуры  $f(I, v)$  над поверхностью прямоугольника со сторонами, соответствующими интервалам значений потребляемого тока  $[I_{Ri}, I_{Ri+1}]$  и скорости  $[v_{Ri}, v_{Ri+1}]$ :

$$P(C_R) = \iint_{I_{Ri} v_{Ri}}^{I_{Ri+1} v_{Ri+1}} f(I, v) dI dv.$$

$P(I, v)$  – полная вероятность наблюдений  $v(t)$  и  $I(t)$  от начала функционирования  $t_0$  до текущего момента  $t_i$ , которая может быть вычислена по формуле

$$P(I, v) = \iint_{I_0 v_0}^{I_n v_n} f(I, v) dI dv.$$

Динамика изменения совместной функции плотности вероятности  $f(I, v)$  и применение классификатора «наивный Байес» позволяет в любой момент времени провести классификацию по результатам нового наблюдения, поскольку применение метода ядерной оценки плотности позволяет адаптировать классификатор для работы в условиях зависимых переменных. Следует учесть, что применение метода ядерной оценки плотности и адаптация «наивного Байеса» в обязательном порядке тестируются по результатам опытных данных, чтобы убедиться в эффективности и корректности получаемых результатов. С этой целью предполагается использовать метод кросс-валидации для оценки адекватности модели реальным данным.

Изменение технического состояния электроаппаратуры под действием деструктивных факторов представляет перманентный процесс. Он протекает на протяжении всех стадий жизненного цикла. Интерпретация изменения технического состояния в виде перемещения плотности двумерного распределения в вероятностном пространстве по плоскости классов работоспособности позволяет корректно визуализировать динамику состояния объекта и дает возможность оценивать вероятность перехода из одного класса работоспособности в другой.

С учетом отсутствия эксплуатационных данных на начальном этапе имеется только возможность гипотетической формализации критического состояния, которое будет характеризоваться сочетанием «большой потребляемый ток» и «низкая скорость движения». Параметрическая модель возможного отказа для подобного сочетания на начальном этапе сопоставляется точке на дальней стороне прямоугольника класса работоспособности «критический» (рис. 3, 4). Разумеется, в процессе обучения модели предполагаемое местоположение отказа на плоскости классов работоспособности будет уточняться.

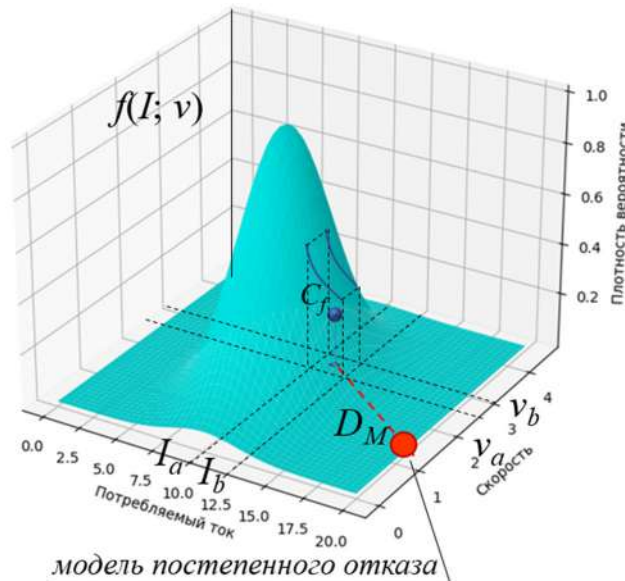


Рис. 4. График совместной плотности вероятности распределения случайных величин  $f(I, v)$

Помимо распознавания принадлежности технического состояния к определенному классу работоспособности, которое заключается в определении апостериорной вероятности (1), наиболее значимой для практики является задача выбора метрики и оценивания удаленности центра рассеивания параметров  $I(t)$  и  $v(t)$  из априорной информации от модели гипотетического отказа [2]. Для решения этой задачи оптимально подходит метод ближайших соседей [3]. В качестве функции расстояния предлагается назначить метрику, с использованием которой можно принимать решение о приближении предельного состояния. Принимая во внимание то, что совместное распределение  $f(I; v)$  под влиянием процесса старения электроаппаратуры перемещается в вероятностном пространстве, необходимо выбрать меру, оценивающую расстояния между векторами случайных величин. Такой мерой, которая широко задействуется в методах классификации, является расстояние Махаланобиса [9].

Явным маркером, подтверждающим идентификацию текущего состояния как критического является апостериорная вероятность  $P(I, v | C_R)$ , которая рассчитывается по формуле (2). Интерпретируется объемной фигурой в вероятностном пространстве с основанием в виде прямоугольника с координатами:  $(I(t_{ai}), v(t_{ai}))$ ;  $(I(t_{ai}), v(t_{bi}))$ ;  $(I(t_{bi}), v(t_{ai}))$  и  $(I(t_{bi}), v(t_{bi}))$  (рис. 3, 4).

Расстояние Махаланобиса  $D_M$  является удобным способом измерения расстояния между проекцией центроида двумерного распределения  $P(I, v | C_R)$  и точкой на плоскости классов работоспособности, соответствующей гипотетическому отказу, так как учитывает корреляцию между переменными и нормализует различия в масштабах.

Расчет расстояния Махаланобиса  $D_M$  от точки проекции центроида фигуры  $P(I, v | C_R)$  до точки модели гипотетического отказа в вероятностном пространстве производится в следующей последовательности. В начале рассчитываются координаты проекции центроида  $C_f$  распределения  $P(I, v | C_R)$ :

$$C_f = (E[I | I_a < I < I_b], E[v | v_a < v < v_b]),$$

где  $E[I]$  и  $E[v]$  – условные математические ожидания потребляемого тока  $I(t)$  и скорости  $v(t)$  в интервалах  $[I_a; I_b]$  и  $[v_a; v_b]$ , соответствующих сторонам основания  $P(I, v | C_R)$  (см. рис. 4). Они рассчитываются следующим образом:

$$E[I | I_a < I < I_b, v_a < v < v_b] = \frac{1}{P(I_a < I < I_b, v_a < v < v_b)} \int_{a_I}^{b_I} \int_{a_v}^{b_v} I f(I, v) dI dv,$$

$$E[v | I_a < I < I_b, v_a < v < v_b] = \frac{1}{P(I_a < I < I_b, v_a < v < v_b)} \int_{a_I}^{b_I} \int_{a_v}^{b_v} v f(I, v) dI dv.$$

На их основе формируется вектор  $\mu$ , представляющий собой центроид:

$$\mu = \begin{bmatrix} E[I] \\ E[v] \end{bmatrix}.$$

Тогда вектор точки гипотетического отказа:  $F = \begin{bmatrix} I_f \\ v_f \end{bmatrix}$ .

Затем производится расчет вектора смещения между точкой гипотетического отказа и центроидом:

$$D = F - \mu = \begin{bmatrix} I_f - E[I] \\ v_f - E[v] \end{bmatrix}.$$

Далее необходимо составить ковариационную матрицу  $C$  для двумерного распределения случайных величин  $I(t)$  и  $v(t)$ . Обратная ковариационная матрица  $C^{-1}$  рассчитывается на основе ковариационной матрицы:

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_{II} & \sigma_{Iv} \\ \sigma_{vI} & \sigma_{vv} \end{bmatrix},$$

$$C^{-1} = \frac{1}{\det(C)} \begin{bmatrix} \sigma_{vv} & -\sigma_{Iv} \\ -\sigma_{vI} & \sigma_{II} \end{bmatrix},$$

где  $\sigma_{II}$  – дисперсия случайной величины потребляемого тока  $I(t)$ :

$$\sigma_{II} = \frac{1}{|I_b - I_a|} \int_{I_a}^{I_b} (I(t_i) - E[I])^2 dI;$$

$\sigma_{vv}$  – дисперсия случайной величины скорости движения  $v(t)$ :

$$\sigma_{vv} = \frac{1}{|v_b - v_a|} \int_{v_a}^{v_b} (v(t_i) - E[v])^2 dv;$$

$\sigma_{Iv}$ ,  $\sigma_{vI}$  – ковариация между двумя случайными величинами  $I(t)$  и  $v(t)$ , характеризующая зависимость изменений одной переменной от другой, рассчитывается по формуле

$$\sigma_{Iv} = \sigma_{vI} = \text{Cov}(I(t), v(t)) = \frac{1}{t_b - t_a} \int_{t_a}^{t_b} (I(t_i) - E[I])(v(t_i) - E[v]) dt,$$

$\det(C)$  – определитель ковариационной матрицы.

На заключительном этапе рассчитывается расстояние Махаланобиса по формуле

$$D_M = \sqrt{D^T C^{-1} D},$$

где  $D^T$  – транспонированный вектор смещения, а результат  $D_M$  – это расстояние Махаланобиса от центроида до точки гипотетического отказа. Полученный результат может использоваться для оценивания удаленности точки с координатами гипотетического отказа от центроида распределения, идентифицирующего текущее состояние электроаппаратуры комплекса. В дальнейшем полученная информация послужит основой для принятия решений о необходимости назначения технического обслуживания.

В соответствии с классической постановкой задачи при применении методов статистической классификации в процессе обучения модели прогнозирования должна устанавливаться экстраполяционная связь между текущим состоянием электроаппаратуры и определенным классом работоспособности [2]. В ходе моделирования процесса наступления предельного состояния эта связь выражается посредством значения апостериорной вероятности принадлежности к классу работоспособности с уровнем «критический». Затем оценивается его удаленность в вероятностном пространстве от гипотетического отказа.

Подобный подход к моделированию процесса изменения технического состояния гармонично укладывается в рамки концепции, допускающей доработку диагностического обеспечения для решения задачи прогнозирования технического состояния РТК на этапе испытаний и даже, возможно, эксплуатации по причине отсутствия аналогов этого принципиально нового вида техники.

В этот промежуток времени осуществляется обучение модели распознавания технического состояния, которое, прежде всего, включает коррекцию базы правил и, как следствие, классов работоспособности. Их количество и качественная оценка могут изменяться по мере старения электроаппаратуры, что должно быть учтено в модели распознавания.

Важной частью вероятностной модели, основанной на классах работоспособности, является уточнение параметрических интервалов для каждого класса. Это достигается на основе анализа распределений эксплуатационных данных.

### Заключение

Таким образом, предлагаемая модель процесса изменения технического состояния электроаппаратуры РТК позволяет получить решение об идентификации текущего состояния объекта с использованием методов статистической классификации. По результатам моделирования становится возможным на основе нечеткого логического вывода формализовать понятие «класса работоспособности», а затем оценить апостериорную вероятность принадлежности текущего состояния к определенному классу. Использование метода ядерной оценки плотности вероятности для построения совместного распределения диагностических параметров демонстрирует корректные результаты, позволяющие улучшить адаптацию классификатора «наивный Байес» в контексте зависимых переменных. Это сохраняет вероятностную природу подхода, учитывая при этом реальные зависимости между переменными, что приводит к более точному моделированию и интерпретации данных.

Предлагаемая модель распознавания позволяет классифицировать текущее состояние электроаппаратуры в соответствующий класс, а сами классы работоспособности служат основой для прогнозирования изменений и принятия решений по управлению состоянием РТК. Эти понятия обеспечивают структурированное, обоснованное представление о зарождении и развитии постепенных отказов, что особенно важно в условиях мониторинга технического состояния и поддержки безотказности электроаппаратуры.

### Список литературы

1. Проактивная концепция ТОиР // Ассоциация ЕАМ. URL: <https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html> (дата обращения: 12.09.2024).
2. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т. А., Мозгалеvский А. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / под ред. Т. А. Голинкевича. М. : Сов. радио, 1974. 224 с.
3. Mashanski A. Метод k-ближайших соседей (k-nearest neighbour) // Proglib. URL: <https://proglib.io/p/metod-k-blizhayshih-sosedey-k-nearest-neighbour-2021-07-19> (дата обращения: 10.10.2024).
4. Заяра А. В., Данилин М. Е. Применение нечеткого логического вывода для моделирования процесса изменения технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 120–125. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
5. Штовба С. Д. Классификация объектов на основе нечеткого логического вывода // ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/publication/280064772\\_Klassifikacia\\_obektov\\_na\\_osnove\\_necetkogo\\_logiceskogo\\_vyvoda](https://www.researchgate.net/publication/280064772_Klassifikacia_obektov_na_osnove_necetkogo_logiceskogo_vyvoda) (дата обращения: 07.10.2024).
6. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ эффективности методов дискретизации области значений двумерной случайной величины при синтезе непараметрической оценки плотности вероятности // Информатика и системы управления. Стохастические системы. 2016. № 3. С. 78–85.
7. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Общероссийский математический портал. URL: [https://www.mathnet.ru/links/614b29a5189e7b2f12\\_deb4487f018c1c/typ1130.pdf](https://www.mathnet.ru/links/614b29a5189e7b2f12_deb4487f018c1c/typ1130.pdf) (дата обращения: 10.10.2024).
8. Changbo Zhu. A Hierarchical Bayesian Model for Inferring and Decision Making in Multi-Dimensional Volatile Binary Environments // SCISPPACE. URL: <https://typeset.io/papers/a-hierarchical-bayesian-model-for-inferring-and-decision-11s9rd2b> (дата обращения: 15.10.2024).
9. Serzen Cansiz. Mahalanobis Distance and Multivariate Outlier Detection in R // builtin. URL: <https://builtin.com/data-science/mahalanobis-distance> (дата обращения: 16.10.2024).

### References

1. Proactive MRO concept. *Assotsiatsiya EAM = EAM Association*. (In Russ.). Available at: <https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html> (accessed 12.09.2024).
2. Gaskarov D.V., Golinkevich T.A., Mozgalevskiy A.V. *Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury = Forecasting the technical condition and reliability of electronic equipment*. Moscow: Sov. radio, 1974:224. (In Russ.)
3. Mashanski A. The k-nearest neighbor method. *Proglib*. (In Russ.). Available at: <https://proglib.io/p/metod-k-blizhayshih-sosedey-k-nearest-neighbour-2021-07-19> (accessed 10.10.2024).
4. Zayara A.V., Danilin M.E. Application of fuzzy logical inference for modeling the process of changing the technical condition of electrical equipment of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):120–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
5. Shtovba S.D. Classification of objects based on fuzzy logical inference. *ResearchGate*. (In Russ.). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/280064772\\_Klassifikacia\\_obektov\\_na\\_osnove\\_necetkogo\\_logiceskogo\\_vyvoda](https://www.researchgate.net/publication/280064772_Klassifikacia_obektov_na_osnove_necetkogo_logiceskogo_vyvoda) (accessed 07.10.2024).
6. Lapko A.V., Lapko V.A. Analysis of the effectiveness of methods for discretizing the range of values of a two-dimensional random variable in the synthesis of a nonparametric probability density estimate. *Informatika i sistemy upravleniya. Stokhasticheskie sistemy = Informatics and Control Systems. Stochastic systems*. 2016;(3):78–85. (In Russ.)
7. Epanechnikov V.A. Nonparametric estimation of multidimensional probability density. *Obshcherossiyskiy matematicheskiy portal = All-Russian Mathematical Portal*. (In Russ.). Available at: [https://www.mathnet.ru/links/614b29a5189e7b2f12\\_deb4487f018c1c/typ1130.pdf](https://www.mathnet.ru/links/614b29a5189e7b2f12_deb4487f018c1c/typ1130.pdf) (accessed 10.10.2024).
8. Changbo Zhu. A Hierarchical Bayesian Model for Inferring and Decision Making in Multi-Dimensional Volatile Binary Environments. *SCISPPACE*. Available at: <https://typeset.io/papers/a-hierarchical-bayesian-model-for-inferring-and-decision-11s9rd2b> (accessed 15.10.2024).
9. Serzen Cansiz. Mahalanobis Distance and Multivariate Outlier Detection in R. *Built In*. Available at: <https://builtin.com/data-science/mahalanobis-distance> (accessed 16.10.2024).

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Максим Евгеньевич Данилин**

генеральный директор,  
Научно-производственное объединение «Аванти»  
(Россия, г. Казань, ул. Тополевая, 57)  
E-mail: metod@avgr.tech

**Maksim E. Danilin**

General director,  
Scientific and Production Association "Avanti"  
(57 Topolevaya street, Kazan, Russia)

**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

**Andrey V. Zayara**

Candidate of technical sciences,  
senior research fellow of the research department,  
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 15.09.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 07.10.2024**

**Принята к публикации/Accepted 15.10.2024**

## МЕТОД ОКОННОГО СГЛАЖИВАНИЯ И КОРРЕКЦИИ ТРАЕКТОРИИ, ЗАДАННОЙ В ВИДЕ ЗАШУМЛЕННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТОЧЕК

В. Н. Белотелов

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия  
vbelotelov@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматривается траектория движения объекта, представленная в виде набора последовательных GPS-координат точек. Координаты точек содержат значительную шумовую составляющую. Предлагается метод оконного сглаживания для восстановления истинной траектории, учитывающий и нейтрализующий смещение сглаженной траектории внутрь поворотов. Данный метод не требует дополнительной информации о модели движения объекта. *Материалы и методы.* В работе предлагается использовать оконное сглаживание для восстановления траектории движения объекта по зашумленному набору координат. При оконном сглаживании на поворотах происходит смещение сглаженной траектории внутрь поворота. Предлагается метод оценки величины и направления такого смещения для каждой сглаженной точки. Полученные значения затем используются для коррекции сглаженной траектории. *Результаты и выводы.* Разработанный метод успешно применяется для построения траектории движения приборов, содержащих GPS-приемник для определения собственных координат. Приведенные результаты получены на реальных данных.

**Ключевые слова:** зашумленная траектория, оконное сглаживание, коррекция сглаженной траектории, траектория GPS

**Для цитирования:** Белотелов В. Н. Метод оконного сглаживания и коррекции траектории, заданной в виде зашумленной последовательности точек // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 31–40. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-4

## A METHOD OF WINDOW FILTERING AND TRAJECTORY CORRECTION FOR A NOISY POINT SEQUENCE

V.N. Belotelov

Federal Research Center "Computer Science and Control" of the RAS, Moscow, Russia  
vbelotelov@gmail.com

**Abstract.** *Background.* A trajectory of a moving object is considered that is provided as a sequence of GPS point coordinates. The coordinates data contain a substantial amount of noise. A method of window filtering is proposed that takes into account and negates trajectory displacement on a turn towards the center of that turn. The method does not require any additional information concerning the motion model of the object. *Materials and methods.* It is proposed to use window filtering to reconstruct the trajectory of the moving object given a sequence of noisy GPS data. Window filtering applied to a turning trajectory displaces the trajectory towards the center of the turn. A method is proposed to evaluate the absolute value and direction of such displacement for each point. The obtained values are then used to correct each point of the smoothed trajectory. *Results and conclusions.* The proposed method was successfully applied to produce smoothed trajectories of motion for devices that use GPS receiver to get their coordinates. The results shown in the current article are based on real data.

**Keywords:** noisy trajectory, window filtering, correction of smoothed trajectory, GPS trajectory

**For citation:** Belotelov V.N. A method of window filtering and trajectory correction for a noisy point sequence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):31–40. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-4

### Введение

Фильтрации данных GPS (или иной системы геопозиционирования) посвящено множество работ, поскольку сами данные GPS для гражданских приемников, которыми оснащено подавляющее большинство устройств, так или иначе связанных с геолокацией, содержат шумы, и хорошей точностью считается получение координат с ошибкой в два-три метра. Для фильтрации используются

различные способы. В настоящее время популярны исследования, связанные с привязкой GPS-приемника к дорожной сети, например, для автомобильной навигации [1]. В таких работах используется дополнительная информация о структуре дорожной сети. Также популярны методы, использующие видеоинформацию с заранее известными координатами фотографий местности [2]. Такой способ геопривязки подходит для автономных роботов, которые должны передвигаться по заранее известной местности и в процессе позиционировать себя на известной карте. Задача сглаживания координат для построения уточненной траектории движения рассматривается, например, в работах [3, 4]. Однако для рассматриваемых там задач точности, получаемой при обычном оконном сглаживании, оказывается достаточно.

При сглаживании траектории самым популярным методом оказывается фильтр Калмана [5–7]. Такой фильтр требует дополнительной информации о модели движения объекта. Поскольку основной платформой, на которой применяются в быту GPS-приемники, остается мобильный телефон, многие приложения используют встроенные ИНС и с помощью фильтра Калмана уточняют координаты на основании данных с приемника.

Для получения сглаженных траекторий также используются другие методы, например, где используются различные комбинации статистических и эвристических фильтров [8].

В данной работе предлагается простой метод, основанный на оконном сглаживании траектории движения объекта. При использовании оконного сглаживания траектория на поворотах смещается внутрь поворота. Величина смещения при этом зависит от ширины окна. При более широком окне сглаженная траектория более гладкая, однако больше смещена к центру поворота относительно истинной траектории. В работе оценивается величина и направление смещения каждой траектории к центру поворота, и затем производится коррекция каждой точки для восстановления истинной траектории. Предложенный метод не требует информации о характере движения объекта и подходит для постобработки данных для таких объектов, в характере движения которых отсутствуют резкие скачки скорости или направления.

Автору неизвестны работы, где рассматривалось бы уточнение траектории подобным образом.

### Постановка задачи

Рассматривается задача геопозиционирования прибора, содержащего гражданский GPS-приемник, на местности. Прибор записывает данные, например магнитного поля, или иные физические параметры, и необходимо сопоставить координаты записанных данных с местностью. При этом такое сопоставление можно делать в постобработке, т.е. все данные о траектории движения прибора доступны в момент обработки.

Траектория движения прибора (его GPS-приемника) задается в виде последовательности точек, которые представляют собой пары GPS-координат, занесенных в файл данных в формате Градусы-минуты-доли минут. Координаты GPS сильно зашумлены, и если представить смещение как нормально распределенную случайную величину, то ее среднеквадратичное отклонение может составлять 2–3 м.

Координаты GPS в гражданском приемнике обновляются один раз в секунду. Предположим, что прибор движется равномерно. Тогда привязка координат производится через равные расстояния, соответствующие расстоянию, пройденному прибором за единицу времени, т.е. за 1 с. При реальном движении прибора, конечно, скорость его может варьировать в процессе движения, однако будем считать, что резких изменений не происходит.

Дополнительной информации о характере движения прибора нет.

При таких условиях, в отличие от определения координат в реальном времени, когда координаты «в будущем» недоступны, для сглаживания траектории движения можно пользоваться оконным фильтром. Для корректной работы такого фильтра необходимо перейти от угловых координат приемника к метрической сетке.

### Пересчет GPS-координат в XY-координаты местности

Поскольку GPS-координаты являются угловыми координатами (долгота/широта), для их преобразования в единицы длины необходимо перейти к их проекции на какую-либо карту. В данной работе использовались формулы пересчета в стандартной проекции UTM (Universal Transverse Mercator). Описание способа пересчета из угловых координат в метрические и обратно подробно представлено в работе [9], где автор ссылается на два способа пересчета, дающих приблизительно одинаковую точность, а также приводит формулы пересчета.

При обработке координат сначала преобразуем все GPS-координаты  $(lon_i, lat_i)$  к прямоугольным декартовым  $(X_i, Y_i)$ . Затем сместим начало координат таким образом, чтобы начало координат находилось в стартовой точке движения (т.е. из всех координат необходимо вычесть самую первую пару координат)

$$(x_i, y_i) = (X_i, Y_i) - (X_1, Y_1).$$

Здесь мы считаем, что нумерация координат начинается с единицы.

### Оконное сглаживание траектории на метрической сетке

Массив координат, заданный в виде  $(x_i, y_i)$ , имеет вид аналогичный представленному на рис. 1. Пусть  $L$  – длина всего массива, т.е. общее количество записей координат.

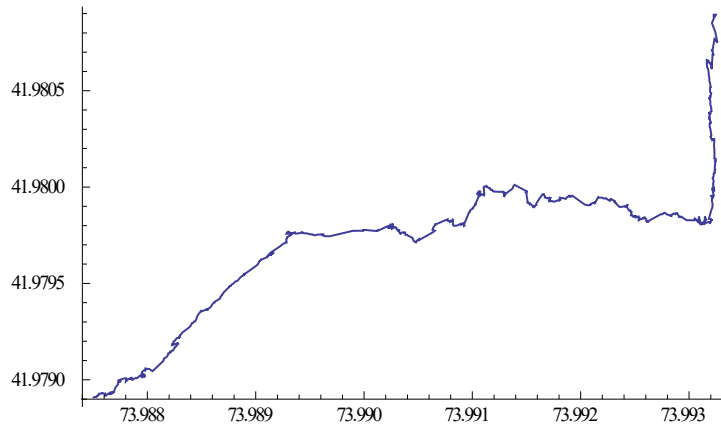


Рис. 1. GPS-координаты  $Lon, Lat$  (градусы долготы и широты)

Преобразованиями, описанными в пункте 2, получим массив координат на местности с началом в первой точке массива (в данном примере это точка справа вверх).

Для сглаживания координат будем применять оконный фильтр с окном Хэмминга. Пусть  $W$  – ширина окна сглаживания,  $W = 2N + 1$ . Тогда значения коэффициентов будут иметь вид

$$\tilde{f}_i = \alpha + (1 - \alpha) \cos \frac{2\pi i}{W}, \quad -N \leq i \leq N, \quad \alpha = 0,54. \quad (1)$$

Коэффициенты отмечены волнами, потому что их сумма не равняется единице. Для окна с единичным коэффициентом усиления сумма коэффициентов должна быть единичной, поэтому необходимо произвести нормировку:

$$f_i = \frac{\tilde{f}_i}{\sum_{k=-N}^{k=N} \tilde{f}_k}. \quad (2)$$

Можно также пользоваться другими видами окон, например, окном Блэкмана. Нормировку необходимо производить в любом случае.

При построении сглаженной траектории производится расчет точек новой траектории по старым точкам с помощью следующей формулы:

$$\tilde{x}_n = \sum_{k=-N}^{k=N} f_k x_{n+k}; \quad \tilde{y}_n = \sum_{k=-N}^{k=N} f_k y_{n+k}. \quad (3)$$

В формуле (3) при величинах  $x$  и  $y$  могут оказаться индексы, выходящие за границы исходного массива координат. В этом случае можно поступать различными способами. Один из способов заключается в том, чтобы рассчитывать сглаженные координаты для значений индекса  $N + 1 \leq n \leq L - N - 1$ .

Если необходимо получить также точки траектории, находящиеся ближе к границам диапазона, то рекомендуется доопределить массив координат  $(x_i, y_i)$  с каждой стороны  $N$  значениями, например, следующим образом (напомним, нумерация массива начинается с 1):

$$\begin{aligned} (x_{1-k}, y_{1-k}) &= 2(x_1, y_1) - (x_{1+k}, y_{1+k}) \text{ для } 1 \leq k \leq N; \\ (x_{L+j}, y_{L+j}) &= 2(x_L, y_L) - (x_{L-j}, y_{L-j}) \text{ для } 1 \leq j \leq N. \end{aligned} \quad (4)$$

После такого доопределения формула (3) будет справедлива для значений индекса  $1 \leq n \leq L$ .

Доопределение вида (4) добавляет в массив координат точки таким образом, чтобы точки с индексом  $1-k$  были симметричны соответствующим точкам с индексом  $1+k$  относительно начальной точки (с индексом 1), а точки с индексом  $L+j$  – симметричны соответствующим точкам с индексом  $L-j$  относительно конечной точки с индексом  $L$ . При таком доопределении начальная и конечная точки массива останутся на своих местах, и по мере увеличения индекса  $n$  будет вступать в силу фильтрация.

### Формулы расчета производных и векторов нормали для кривой, заданной в виде набора точек

Для дальнейшей работы потребуется вычисление первых и вторых производных, а также касательного и нормального векторов к траектории в заданной точке. Выведем приближенные формулы для вычисления производных.

#### Вычисление производных

Пусть некоторая функция  $u(x)$  задана своими значениями на последовательности точек

$$u_i = u(x_i). \quad (5)$$

Воспользуемся разложением функции  $u$  в ряд Тейлора в окрестности точки  $x_n$ :

$$u(x_n + h) \approx u(x_n) + h \frac{du(x)}{dx} \Big|_{x=x_n} + \frac{h^2}{2} \frac{d^2u(x)}{dx^2} \Big|_{x=x_n}. \quad (6)$$

Обозначим расстояние между парами последующих точек  $x_n - x_{n-1} = h_m$ ,  $x_{n+1} - x_n = h_p$ . Здесь « $m$ » – «minus», т.е. предыдущий шаг, а « $p$ » – «plus» – последующий. Запишем для значений функции  $u_m = u_{n-1}$  и  $u_p = u_{n+1}$  равенство (6), сокращенное до первой производной:

$$u_p \approx u_n + h_p \frac{du}{dx}, \quad u_m \approx u_n - h_m \frac{du}{dx}. \quad (7)$$

Выражения (7) рассмотрим как уравнения относительно производной  $\frac{du}{dx}$ . Выразим эту производную из обоих уравнений, возьмем среднее значение с неизвестными коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\frac{du}{dx} \Big|_{x=x_n} \approx \left( \alpha \frac{u_p - u_n}{h_p} + \beta \frac{u_n - u_m}{h_m} \right). \quad (8)$$

Выбор коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  произведем таким образом, чтобы формула (8) имела максимальный порядок точности, по аналогии с расчетом разностных схем в работе [10]. Так, если выбрать

$$\alpha = \frac{h_m}{h_m + h_p}, \quad \beta = \frac{h_p}{h_m + h_p}, \quad (9)$$

то формула (8) будет точна на многочленах второго порядка, т.е. приближает производную в окрестности точки  $x_n$  с точностью до  $O(h^2)$ :

$$\left. \frac{du}{dx} \right|_{x=x_n} \approx \left( \frac{h_m(u_p - u_n)}{h_p(h_m + h_p)} + \frac{h_p(u_n - u_m)}{h_m(h_m + h_p)} \right). \quad (10)$$

При одинаковом шаге, т.е. если  $h_p = h_m = h$ , получаем известную формулу для приближения первой производной

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_p - u_m}{2h}.$$

Для получения выражения второй производной запишем приближение по трем точкам с неизвестными коэффициентами:

$$\left. \frac{d^2u}{dx^2} \right|_{x=x_n} \approx \alpha u_m + \beta u_n + \gamma u_p. \quad (11)$$

Потребуем, чтобы приближение (11) было точно на многочленах второго порядка. Запишем для многочлена  $u = ax^2 + bx + c$  приближение (11), принимая во внимание (5):

$$\left. \frac{d^2u}{dx^2} \right|_{x=x_n} - \alpha u_m - \beta u_n - \gamma u_p = q_2 x_n^2 + q_1 x_n + q_0, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} q_0 &= -a(\alpha + \beta + \gamma) + c(\alpha h_m - \gamma h_p) - b(\alpha h_m^2 + \gamma h_p^2 - 2); \\ q_1 &= -c(\alpha + \beta + \gamma) + 2b(\alpha h_m - \gamma h_p); \\ q_2 &= -b(\alpha + \beta + \gamma). \end{aligned} \quad (13)$$

Для того, чтобы приближение было точным на всех многочленах второго порядка, необходимо и достаточно, чтобы коэффициенты (13) были тождественно равны нулю. Это условие приводит к системе линейных уравнений относительно коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , разрешая которую, получаем

$$\alpha = \frac{2}{h_m(h_m + h_p)}, \quad \beta = -\frac{2}{h_m h_p}, \quad \gamma = \frac{2}{h_p(h_m + h_p)}. \quad (14)$$

Таким образом, можем записать формулу для приближения второй производной

$$\left. \frac{d^2u}{dx^2} \right|_{x=x_n} \approx 2 \frac{h_p u_m - (h_m + h_p) u_n + h_m u_p}{h_m h_p (h_m + h_p)}. \quad (15)$$

Эта формула приближает вторую производную в точке  $x = x_n$  с точностью до  $O(h^2)$ . При одинаковых значениях шага  $h_p = h_m = h$  она превращается в классическое приближение второй производной

$$\frac{d^2u}{dx^2} \approx \frac{u_p - 2u_n + u_m}{h^2}.$$

Точность при одинаковых значениях шага также повышается. Можно показать, что в этом случае формула (15) точна для многочленов третьей степени [10].

### **Вычисление векторов касательной и нормали в точке**

Пусть кривая задана параметрически:

$$\gamma = \{x(s), y(s)\}. \quad (16)$$

Будем считать, что  $s$  – это натуральный параметр, т.е. путь, пройденный вдоль кривой. Тогда согласно классическим формулам [11], направляющие векторы касательной к кривой  $\vec{\tau}$  и нормали к кривой  $\vec{n}$  в точке  $(x^*, y^*)$  имеют вид

$$\vec{\tau}(x^*, y^*) = \pm \left( \frac{dx}{ds}, \frac{dy}{ds} \right) \Big|_{x=x^*; y=y^*}; \quad \vec{n}(x^*, y^*) = \pm \left( -\frac{dy}{ds}, \frac{dx}{ds} \right) \Big|_{x=x^*; y=y^*}. \quad (17)$$

Здесь знак «+» у вектора касательной означает, что вектор направлен в сторону увеличения параметра  $s$ , а у вектора нормали, что он направлен «влево» на  $90^\circ$  относительно вектора касательной со знаком «+» (рис. 2), а знаки «-» соответствуют противоположным векторам.

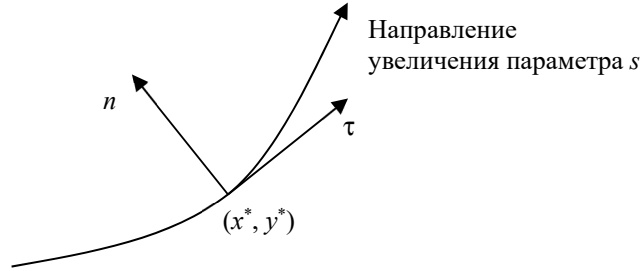


Рис. 2. Векторы касательной и нормали к кривой, заданной натуральным параметром

В случае, когда кривая задана в виде последовательности точек  $(x_i, y_i)$ , для вычисления векторов нормали  $\vec{n}_i = \vec{n}(x_i, y_i)$  и касательной  $\vec{\tau}_i = \vec{\tau}(x_i, y_i)$  воспользуемся полученными ранее формулами (10):

$$\begin{aligned} \vec{\tau}_i &\approx \left( \frac{h_p(x_i - x_{i-1})}{h_m(h_m + h_p)} + \frac{h_m(x_{i+1} - x_i)}{h_p(h_m + h_p)}, \frac{h_p(y_i - y_{i-1})}{h_m(h_m + h_p)} + \frac{h_m(y_{i+1} - y_i)}{h_p(h_m + h_p)} \right); \\ \vec{n}_i &\approx \left( -\frac{h_p(y_i - y_{i-1})}{h_m(h_m + h_p)} - \frac{h_m(y_{i+1} - y_i)}{h_p(h_m + h_p)}, \frac{h_p(x_i - x_{i-1})}{h_m(h_m + h_p)} + \frac{h_m(x_{i+1} - x_i)}{h_p(h_m + h_p)} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь в качестве локального шага параметра  $s$  выступают

$$h_p = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}; \quad h_m = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}. \quad (19)$$

В случае, когда параметр  $s$  является натуральным, т.е. представляет собой длину пути вдоль кривой, из определения векторов нормали и касательной следует, что их длина равна единице. При вычислении этих векторов с использованием аппроксимированных формул для производных (18), в силу различных вычислительных неточностей, их длина может оказаться отличной от единицы. Рекомендуется после вычисления значений по формулам (18) провести нормировку векторов:

$$\tilde{\tau}_i = \frac{(\tau_{xi}, \tau_{yi})}{\|\vec{\tau}_i\|}, \quad \tilde{n}_i = \frac{(n_{xi}, n_{yi})}{\|\vec{n}_i\|}, \quad (20)$$

где норма вектора  $\|(\ast)\| = \sqrt{(\ast)_x^2 + (\ast)_y^2}$ .

### Компенсация смещения траектории на поворотах

Оконное сглаживание дает несмещенную оценку истинных координат только в том случае, если траектория движения – прямая. В случае, когда траектория имеет повороты, оценка координат точки  $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ , полученная с помощью оконного сглаживания, смещена внутрь поворота на неизвестную величину, которая зависит от истинного положения точек траектории индексами  $i - N \leq i + k \leq i + N$  (т.е. от тех точек, которые попали в окно сглаживания).

Величину смещения можно приближенно определить следующим образом.

Пусть  $\vec{r}_i^* = (x_i^*, y_i^*)$  – радиус-вектор истинной точки с индексом  $i$ ,  $\vec{r}_i = (x_i, y_i)$  – радиус-вектор точки, записанной с помощью GPS-приемника,  $\tilde{r}_i = (\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$  – координаты соответствующей точки, полученные с помощью оконного сглаживания.

Предположим, что форма сглаженной кривой несильно отличается от формы истинной траектории. Тогда вектор нормали к истинной траектории в точке  $\vec{r}_i^*$  приблизительно равен вектору нормали к сглаженной кривой в точке  $\tilde{r}_i$ , и оба они приблизительно определяют вектор  $\vec{e}_i = \frac{\tilde{r}_i - \vec{r}_i^*}{\|\tilde{r}_i - \vec{r}_i^*\|}$ , который представляет собой единичный вектор смещения точки, возникающего в результате оконного сглаживания. Собственно, смещение тогда будет иметь вид  $\vec{\Delta}_i^* = d_i^* \vec{e}_i$ . Величина смещения  $d_i^*$  вдоль этого вектора может быть оценена как взвешенная сумма расстояний от истинных точек траектории  $\vec{r}_{i+k}^*$  до касательной к истинной траектории в точке  $\vec{r}_i^*$ , т.е.

$$d_i^* = \vec{n}_i^* \sum_{k=-N}^{k=N} f_k (\vec{r}_{i+k}^* - \vec{r}_i^*). \quad (21)$$

Здесь коэффициенты  $f_k$  берутся те же, что и при оконном сглаживании (2). Скалярное умножение в выражении (21) дает длину проекции на направление нормали взвешенной суммы векторов, проведенных из точки  $\vec{r}_i^*$  ко всем точкам  $\vec{r}_{i+k}^*$ , участвующим в получении точки сглаженной траектории  $\tilde{r}_i$ , иными словами, взвешенную сумму расстояний от точек, участвующих в расчете точки  $\tilde{r}_i$  до касательной к сглаженной кривой, проходящей через эту точку. Общий вектор смещения точки, таким образом, может быть получен по формуле

$$\tilde{r}_i - \vec{r}_i^* = \vec{\Delta}_i^* = d_i^* \cdot \vec{n}_i^*. \quad (22)$$

Вектор  $\vec{\Delta}_i^*$  есть величина, на которую смещается значение радиус-вектора  $\vec{r}_i^*$  в результате оконного сглаживания.

На практике вместо суммы (21) можно пользоваться аналогичной взвешенной суммой, построенной для сглаженной траектории:

$$d_i = \tilde{n}_i \sum_{k=-N}^{k=N} f_k (\tilde{r}_{i+k} - \tilde{r}_i). \quad (23)$$

Соответственно, вектор смещения можно получить приближенно как

$$\tilde{\Delta}_i = d_i \cdot \tilde{n}_i. \quad (24)$$

Приведенные расчеты проиллюстрированы на рис. 3. Представлена истинная траектория и кривая, полученная сглаживанием данных GPS. Сглаженная кривая смещена внутрь поворота. К сглаженной кривой построен вектор нормали (сплошной стрелкой), для сравнения рядом построен вектор нормали к истинной траектории. В общем случае их различие будет незначительно.

Таким образом, для восстановления радиус-вектора «истинной» траектории  $\vec{r}_i^*$  по точкам сглаженной траектории можно пользоваться следующим алгоритмом:

- 1) вычислить вектор нормали  $\tilde{n}_i$  к сглаженной кривой в точке с индексом  $i$  по формулам (18) и (20);
- 2) рассчитать взвешенную сумму (23) и поправку (24). Следует отметить, что произведение в формуле (23) скалярное, т.е. для двумерных векторов  $\vec{a} \cdot \vec{b} = a_1 b_1 + a_2 b_2$ , а в формуле (24) – покомпонентное, т.е.  $\alpha \cdot \vec{a} = (\alpha a_1, \alpha a_2)$ ;

- 3) вычислить радиус-вектор точки сглаженной траектории с компенсацией смещения:

$$\tilde{\tilde{r}}_i = \tilde{r}_i - \tilde{\Delta}_i. \quad (25)$$

Поскольку знак «+» при смещении  $\tilde{\Delta}_i$  означает вектор, на который точка  $\vec{r}_i^*$  сместилась, то для компенсации этого смещения надо брать поправку с противоположным знаком.

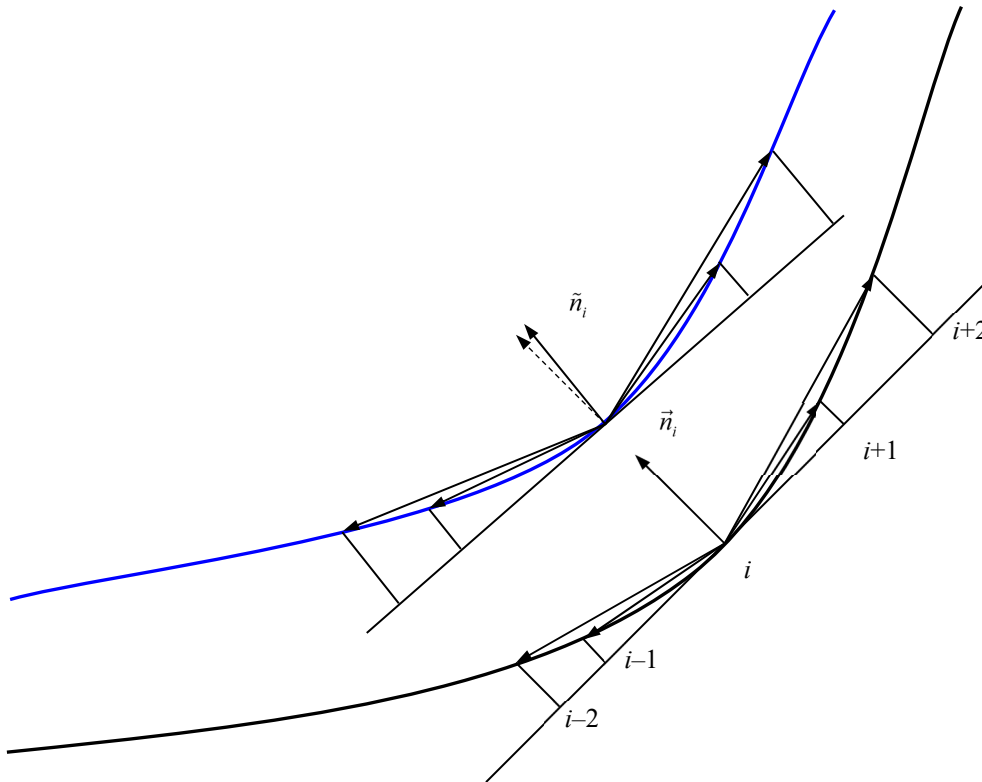


Рис. 3. Истинная траектория (нижняя кривая) и кривая, полученная по данным GPS с помощью сглаживания (верхняя кривая)

### Результаты

Значения величины смещения и результаты работы алгоритма приведены на рис. 4 и 5 (приведены данные только для части траектории, содержащей поворот).

Из рис. 4 видно, что компенсация смещения предложенным методом достигает 1,2 м (использовалось окно Хэмминга с шириной 51 точка).

При необходимости следует провести обратный пересчет координат из метрической сетки в угловые координаты [12].

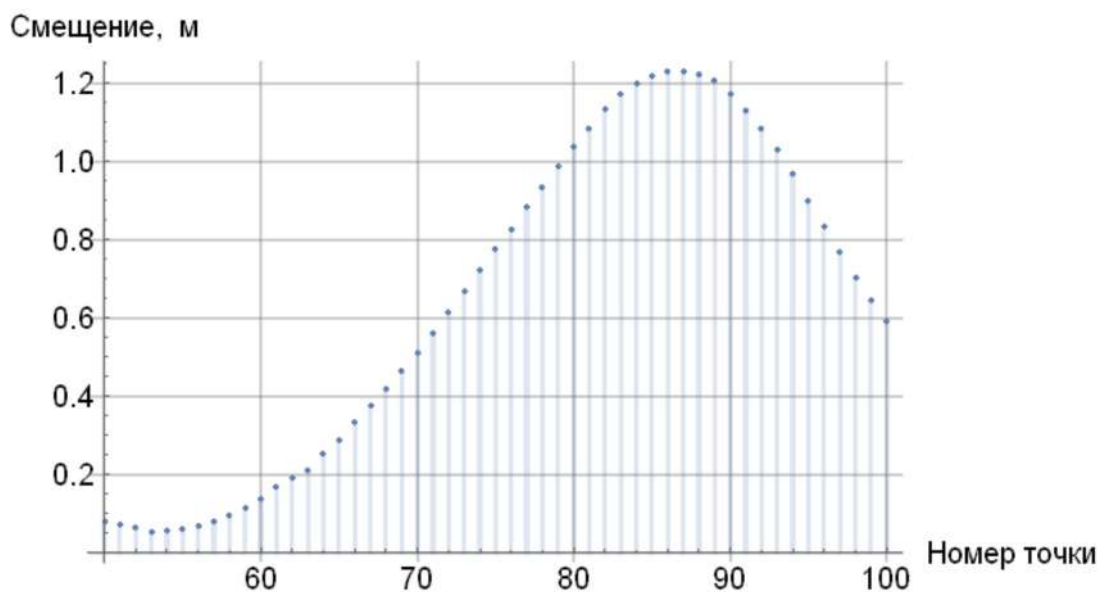


Рис. 4. Величина смещения (м), рассчитанная по предложенному методу (значения для части траектории, содержащей поворот)

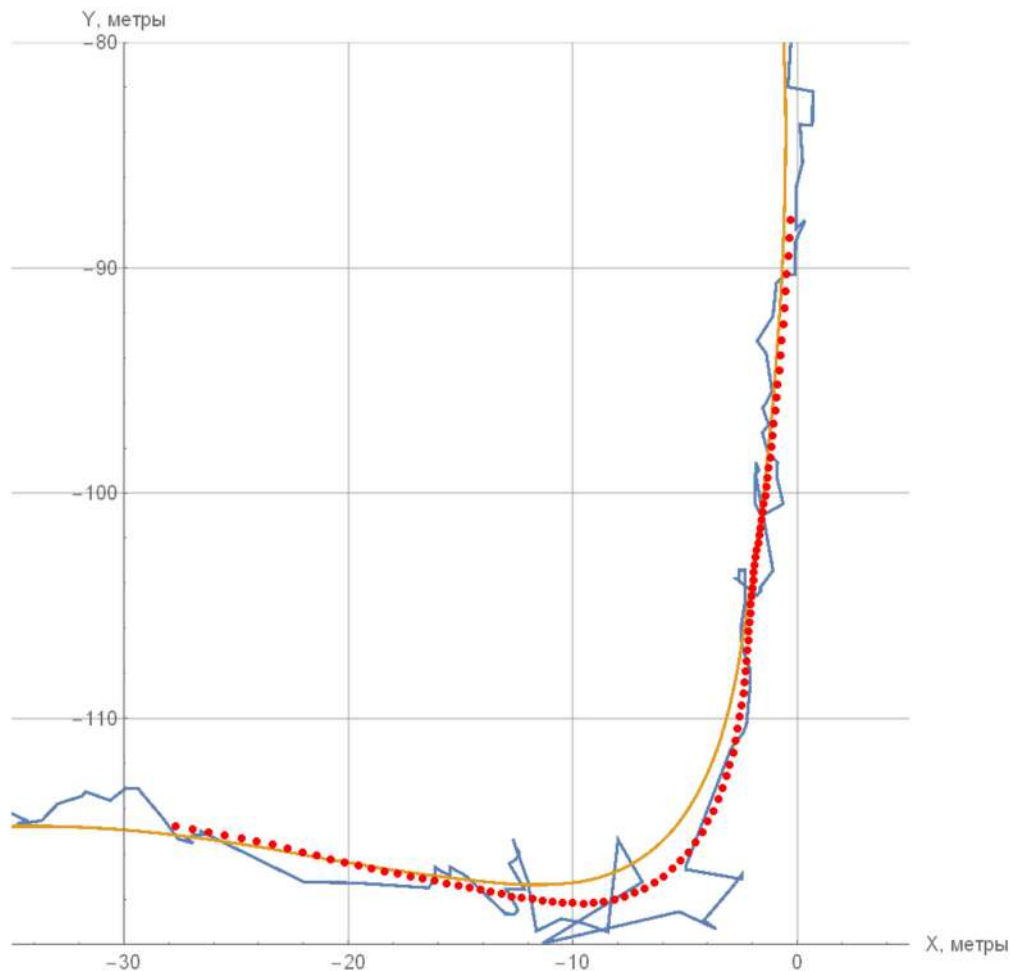


Рис. 5. Результат сглаживания траектории. Ломаная линия – исходные данные, гладкая кривая – сглаживание с применением оконного фильтра, точечная кривая – результат компенсации смещения

### Заключение

В работе предложен метод оконного сглаживания траектории движения прибора с восстановлением координат точек, смещенных внутрь поворотов траектории. При восстановлении не используется никакая информация о характере движения прибора; используется исключительно информация о свойствах окна сглаживания. Данный метод может применяться для пост-обработки траекторий приборов, использующих гражданские GPS-приемники стандартной точности, однако он применим и для других зашумленных траекторий, когда априорная информация о характере движения неизвестна.

### Список литературы

1. Chazal F., Chen D., Guibas L. J. [et al.]. Data-Driven Trajectory Smoothing // 19th International Conference on Advances in Geographic Information Systems SIGSPATIAL (Chicago, 2011).
2. Regmi Krishna, Shah Mubarak. Video Geo-Localization Employing Geo-Temporal Feature Learning and GPS Trajectory Smoothing // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2021. P. 12126–12135.
3. Захаров К. С., Савельев А. И. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. № 24. С. 107–125. doi: 10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125
4. Кобец Н. М. Сглаживание траекторных данных криволинейного движения судна применительно к концепции удаленного навигационного контроля // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. № 48/49. С. 112–116.
5. Cao Y., Mao X. Improved Filtering-Smoothing Algorithm for GPS Positioning // 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (Beijing, China). Beijing, 2008. P. 857–861. doi: 10.1109/ITSC.2008.4732683

6. Хруль С. А., Сонькин Д. А. Повышение точности позиционирования подвижных объектов на основе оригинальных методов фильтрации навигационных данных // Наукоеведение. 2013. Вып. 4, № 17.
7. Zhu Wenjiu, Hou Jie, Liu Zhengqiong, Ding Zhizhong. GPS Positioning Error Compensation Based on Kalman Filtering // Journal of Physics: Conference Series 1920. 2021. P. 012088. doi: 10.1088/1742-6596/1920/1/012088
8. Lin Kunhui, Xu Zhentuan, Qiu Ming [et al.]. Noise filtering, trajectory compression and trajectory segmentation on GPS data // 11th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). 2016. P. 490–495. doi: 10.1109/ICCSE.2016.7581629
9. Dutch S. Converting UTM to Latitude and Longitude (Or Vice Versa). 2009. URL: [https://everobotics.org/pdf/Converting %20UTM %20to %20Latitude %20and %20Longitude.pdf](https://everobotics.org/pdf/Converting%20UTM%20to%20Latitude%20and%20Longitude.pdf)
10. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 632 с.
11. Погорелов А. В. Дифференциальная геометрия. М. : Наука, 1974. 174 с.
12. Roth M., Gustafsson F., Orguner U. On-road trajectory generation from GPS data: A particle filtering/smoothing application // 15th International Conference on Information Fusion. Singapore, 2012. P. 779–786.

### References

1. Chazal F., Chen D., Guibas L.J. et al. Data-Driven Trajectory Smoothing. *19th International Conference on Advances in Geographic Information Systems SIGSPATIAL*. Chicago, 2011.
2. Regmi Krishna, Shah Mubarak. Video Geo-Localization Employing Geo-Temporal Feature Learning and GPS Trajectory Smoothing. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2021:12126–12135.
3. Zakharov K.S., Savel'ev A.I. Smoothing the curvature of the trajectory of a ground robot in three-dimensional space. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwestern State University*. 2020;(24):107–125. (In Russ.). doi: 10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125
4. Kobets N.M. Smoothing trajectory data of the curvilinear motion of a vessel in relation to the concept of remote navigation control. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva = Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping*. 2017;(48/49):112–116. (In Russ.)
5. Cao Y., Mao X. Improved Filtering-Smoothing Algorithm for GPS Positioning. *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (Beijing, China)*. Beijing, 2008:857–861. doi: 10.1109/ITSC.2008.4732683
6. Khrul' S.A., Son'kin D.A. Improving the accuracy of positioning of moving objects based on original methods of filtering navigation data. *Naukovedenie*. 2013;4(17). (In Russ.)
7. Zhu Wenjiu, Hou Jie, Liu Zhengqiong, Ding Zhizhong. GPS Positioning Error Compensation Based on Kalman Filtering. *Journal of Physics: Conference Series 1920*. 2021:012088. doi: 10.1088/1742-6596/1920/1/012088
8. Lin Kunhui, Xu Zhentuan, Qiu Ming et al. Noise filtering, trajectory compression and trajectory segmentation on GPS data. *11th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*. 2016:490–495. doi: 10.1109/ICCSE.2016.7581629
9. Dutch S. *Converting UTM to Latitude and Longitude (Or Vice Versa)*. 2009. Available at: [https://everobotics.org/pdf/Converting %20UTM %20to %20Latitude %20and %20Longitude.pdf](https://everobotics.org/pdf/Converting%20UTM%20to%20Latitude%20and%20Longitude.pdf)
10. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2003:632. (In Russ.)
11. Pogorelov A.V. *Differentsial'naya geometriya = Differential geometry*. Moscow: Nauka, 1974:174. (In Russ.)
12. Roth M., Gustafsson F., Orguner U. On-road trajectory generation from GPS data: A particle filtering/smoothing application. *15th International Conference on Information Fusion*. Singapore, 2012:779–786.

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Вадим Николаевич Белотелов

кандидат технических наук, научный сотрудник,  
Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление» РАН  
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44)  
E-mail: vbelotelov@gmail.com

#### Vadim N. Belotelov

Candidate of technical sciences, researcher,  
Federal Research Center "Computer Science  
and Control" of the RAS  
(44 Vavilova street, Moscow, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 05.09.2024

Поступила после рецензирования/Revised 12.10.2024

Принята к публикации/Accepted 19.10.2024

## РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ ПЕЛЕНГАТОРА С СИСТЕМОЙ КАЛИБРОВКИ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ НА БАЗЕ ПЛИС

И. В. Пешков<sup>1</sup>, В. А. Жигулин<sup>2</sup>, Н. А. Фортунова<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Елецкий государственный университет имени И. А. Бунина, Елец, Россия  
<sup>1</sup> ilvpeshkov@gmail.com, <sup>2</sup> obi4n@yandex.ru, <sup>3</sup> fortunova.nata@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Одним из передовых направлений развития систем пеленгации является применение цифровых антенных решеток и алгоритмов со сверхразрешением. Задача реализации на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) системы калибровки эффекта взаимного влияния и интеграции ее в общий вычислительный блок пеленгатора слабо освещена в литературе и является актуальной. Цель данной работы – создание модели цифрового блока пеленгатора на базе ПЛИС, а также интеграция в полученную систему блока калибровки эффекта взаимного влияния. *Материалы и методы.* Представлены общие принципы работы алгоритмов пеленгации. Рассмотрен эффект взаимного влияния элементов антенных решеток, а также приведена методика учета эффекта при моделировании принимаемого сигнала. Также рассмотрен метод калибровки взаимного влияния по принципу «восстановления» диаграмм направленности. Разработка модели осуществлялась по совмещенному программно-аппаратному методу. Подготовка осуществлялась в среде Simulink, обмен данными между компьютером и отладочной платой осуществлялся за счет технологии FPGA-in-the-loop. *Результаты.* Разработана совмещенная аппаратно-программная модель цифрового блока пеленгатора с калибровкой. Для оценки их работы было проведено сравнение полностью программных и совмещенных моделей. Испытания проводились в несколько циклов при разных начальных условиях. Были получены графики псевдоспектров для обеих разработанных моделей, согласно которым определялась корректность работы систем. Был изучен сгенерированный HDL-код. Проведена оценка потребляемых ресурсов микросхемы ПЛИС. *Выводы.* Полученные результаты демонстрируют корректность работы полученных аппаратно-программных моделей, а также свидетельствуют об эффективности примененного метода калибровки – на графиках наблюдается увеличение разрешающей способности алгоритмов пеленгации. Это улучшение сохраняется при разных углах прихода сигнала и при изменении отношения сигнал/шум (ОСШ). Выигрыш в разрешающей способности при значениях ОСШ не меньше 20 дБ составляет от 3 до 10 дБ. Проводится анализ подхода к построению вычислительного блока. Предлагается способ уменьшения потребления ресурсов ПЛИС за счет применения параллельно-последовательной структуры.

**Ключевые слова:** цифровые алгоритмы пеленгации, взаимное влияние антенных элементов, цифровые антенные решетки, ПЛИС, калибровка взаимного влияния

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00125 (<https://rscf.ru/project/23-21-00125>).

**Для цитирования:** Пешков И. В., Жигулин В. А., Фортунова Н. А. Разработка аппаратно-программной модели пеленгатора с системой калибровки взаимного влияния на базе ПЛИС // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 41–56. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-5

## DEVELOPMENT OF A HARDWARE AND SOFTWARE MODEL OF A DIRECTION FINDER WITH A MUTUAL INFLUENCE CALIBRATION SYSTEM BASED ON FPGA

I.V. Peshkov<sup>1</sup>, V.A. Zhigulin<sup>2</sup>, N.A. Fortunova<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Yelets State University named after I.A. Bunin, Yelets, Russia  
<sup>1</sup> ilvpeshkov@gmail.com, <sup>2</sup> obi4n@yandex.ru, <sup>3</sup> fortunova.nata@mail.ru

**Abstract.** *Background.* One of the leading directions in the development of direction-of-arrival estimation systems is the use of digital antenna arrays and super-resolution algorithms. The task of implementing a system for calibrating the effect of mutual coupling on FPGAs and integrating it into a common computing unit is poorly covered in the literature and is relevant. The purpose of this work is to create a model of a digital DoA estimation unit based on

FPGA, as well as integration of a mutual coupling calibration unit into the resulting system. *Materials and methods.* The general principles of operation of DoA estimation algorithms are presented. The effect of mutual coupling of antenna array elements is considered, and the method of accounting for the effect when modelling the received signal is given. The paper also considers a method for calibrating mutual coupling based on the principle of "restoration" of isolated element patterns. The model was developed using a combined software and hardware method. The preparation was carried out in a Simulink, data exchange between the computer and the debugging board was carried out using FPGA-in-the-loop technology. *Results.* A combined hardware and software model of the DoA estimation unit with calibration has been developed. To evaluate their work, a comparison of fully programmatic and combined models was carried out. The tests were carried out in several cycles under different initial conditions. Pseudospectral graphs were obtained for both developed models, according to which the correctness of the systems was determined. The generated HDL code was studied. The estimation of the consumed resources of the FPGA was carried out. *Conclusions.* The results obtained demonstrate the correctness of the operation of the obtained hardware and software models, and also indicate the effectiveness of the calibration method used – an increase in the resolution of the direction finding algorithms is observed on the graphs. This improvement is maintained at different angles of arrival of the signal and when the SNR changes. The gain in resolution at values of at least 20 dB is from 3 to 10 dB. At the end of the article, an analysis of the approach to building a computing block is carried out. A method is proposed to reduce the consumption of FPGA resources by using a parallel-sequential structure.

**Keywords:** direction-of-arrival estimation, mutual coupling, digital antenna arrays, FPGA, mutual coupling calibration

**Financing:** the research was funded by the Russian Science Foundation Grant No. 23-21-00125 (<https://rscf.ru/project/23-21-00125>).

**For citation:** Peshkov I.V., Zhigulin V.A., Fortunova N.A. Development of a hardware and software model of a direction finder with a mutual influence calibration system based on FPGA. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):41–56. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-5

## Введение

Системы пеленгации получили достаточно широкое распространение в современном мире. Одним из передовых направлений их развития является применение цифровых антенных решеток и специализированных алгоритмов обработки сигнала. Современные методы пеленгации со сверхразрешением позволяют решать задачу определения направления прихода сигнала от нескольких источников с высокой точностью. Если отношение сигнал-шум велико, а отклонение амплитудно-фазового распределения в приемном тракте мало, то источники будут различимы при сколь угодно малом угловом расстоянии между ними. Основное достоинство алгоритмов со сверхразрешением состоит в том, что они позволяют определять количество и угловые координаты источников излучения, не прибегая к физическому перемещению антенной системы, а используя лишь алгоритмические способы обработки принимаемых сигналов.

Недостатком алгоритмов пеленгации со сверхразрешением является их высокая вычислительная сложность. Она затрудняет использование широко распространенных цифровых систем и требует применения особых подходов при проектировании вычислительного блока. Логичным решением данной проблемы является применение схем на базе микросхем ПЛИС. Они подходят для данных целей за счет высокого быстродействия, возможности параллельных вычислений и адаптации к конкретным задачам. Реализация цифрового блока пеленгатора на базе программируемых логических интегральных схем рассмотрена в ряде работ иностранных и отечественных авторов [1–3]. Однако вопрос разработки на ПЛИС системы калибровки эффекта взаимного влияния в составе вычислительного блока изучен гораздо слабее.

Целью данной работы является разработка модели цифрового блока пеленгатора на базе ПЛИС, а также интеграция в полученную систему блока калибровки эффекта взаимного влияния.

## Принципы работы цифровой системы пеленгации

Рассмотрим принцип работы цифровой системы пеленгации. Целью системы пеленгации является определение мощности сигнала на выходе антенны в зависимости от угла прихода сигнала. По максимумам этой функции, называемой псевдоспектром или пеленгационным рельефом, можно оценить, с какого направления поступает радиосигнал.

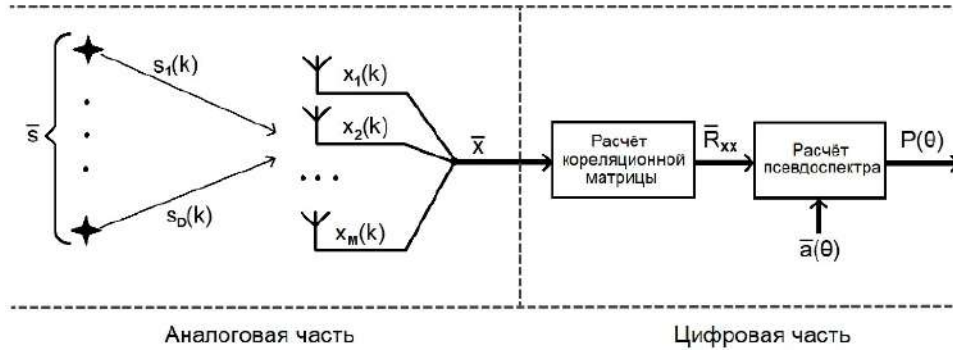


Рис. 1. Общая схема цифрового радиопеленгатора

На рис. 1 представлена обобщенная схема цифрового радиопеленгатора. Ее можно условно разделить на две части: «аналоговую» и «цифровую». В аналоговой части имеется линейная цифровая антенная решетка, состоящая из  $M$  антенных элементов. Она принимает  $D$  независимых сигналов из  $D$  разных направлений с углами  $\theta_D$ . Сигналы поступают на антенну с наложением аддитивного белого гауссовского шума. Сигнал, принятый  $m$ -м антенным элементом, можно выразить следующим образом:

$$x_m(k) = A_m(\theta_1) \cdot s_1(k) + \dots + A_m(\theta_D) \cdot s_D(k) + n(k), \quad (1)$$

где  $s_D(k)$  – падающий сигнал от  $D$ -го источника;  $n(k)$  – шум;  $A_m(\theta_D)$  – фазовый набег  $D$ -го сигнала на  $m$ -м антенном элементе относительно первого элемента. Для линейной антенной решетки фазовый набег рассчитывается следующим образом:

$$A_m(\theta_D) = \exp\left(j(m-1) \frac{2\pi l \sin(\theta_D)}{\lambda}\right), \quad (2)$$

где  $l$  – расстояние между элементами решетки. В матричной форме выражение для расчета выходного сигнала антенной решетки примет следующий вид:

$$\bar{x} = \bar{A} \cdot \bar{s} + \bar{n}, \quad (3)$$

где  $\bar{n}$  – матрица шума;  $\bar{A}$  – матрица сканирующих векторов, рассчитываемая по следующей формуле:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ A_2(\theta_1) & A_2(\theta_2) & & A_2(\theta_D) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ A_M(\theta_1) & A_M(\theta_2) & \dots & A_M(\theta_D) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Принятый сигнал  $\bar{x}$  отцифровывается, после чего  $k$  отсчетов сигнала поступает на вход цифрового обработчика. В цифровой части системы пеленгации происходит сначала расчет корреляционной матрицы  $\bar{R}_{xx}$ , а затем и псевдоспектра  $P(\theta)$ .

Корреляционная матрица рассчитывается по следующей формуле:

$$\bar{R}_{xx} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_1(k) \cdot x_1(k)^* & \dots & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_1(k) \cdot x_M(k)^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_M(k) \cdot x_1(k)^* & \dots & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_M(k) \cdot x_M(k)^* \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $N$  – число отсчетов цифрового сигнала;  $x_M(k)^*$  – нахождение комплексно-сопряженного числа. Далее, исходя из конкретного алгоритма пеленгации, на основе корреляционной матрицы рассчитывается псевдоспектр.

Рассмотрим подробнее конкретные алгоритмы. Начнем с алгоритма Бартлетта [4, 5]. Данный метод появился одним из первых, из задач по оценке спектра в применении к геофизике и обработке данных больших сейсморешеток. Псевдоспектор согласно алгоритму Бартлетта вычисляется следующим образом:

$$P_B(\theta) = \bar{a}(\theta)^H \bar{R}_{xx} \bar{a}(\theta), \quad (6)$$

где  $\bar{a}(\theta)$  – матрица сканирующих векторов для всего диапазона пеленгации;  $\bar{R}_{xx}$  – корреляционная матрица сигналов с выходов элементов антенной решетки.

Перейдем к алгоритму Кейпона [6, 7]. Он дает для пеленгационного рельефа выражение следующего вида:

$$P_C(\theta) = \frac{1}{\bar{a}(\theta)^H \bar{R}_{xx}^{-1} \bar{a}(\theta)}. \quad (7)$$

Алгоритм Кейпона иногда фигурирует под названием алгоритма максимального правдоподобия. Данный метод применим к решеткам любой конфигурации, в том числе к нерегулярным и двумерным, и дает достаточно низкий уровень боковых лепестков, но требует относительно большого числа обучающих выборок.

Алгоритм MUSIC (Multiple Signal Classification – классификация множественных сигналов) относится к группе проекционных алгоритмов (алгоритмов подпространств). Он был предложен Шмидтом [8] и опирается на понятия сигнального и шумового подпространств корреляционной матрицы. Алгоритм MUSIC определяет итоговый псевдоспектр следующим выражением:

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\left| \bar{a}^H(\theta) \bar{E}_N \bar{E}_N^H \bar{a}(\theta) \right|}, \quad (8)$$

где  $\bar{E}_N$  – собственный вектор шумов корреляционной матрицы. Алгоритм MUSIC так же, как и алгоритм Кейпона, применим к антенным решеткам любой конфигурации, но потенциально превосходит метод Кейпона по разрешающей способности, чем и объясняется повышенный интерес к нему со стороны многих исследователей. Недостатками алгоритма MUSIC являются необходимость предварительной оценки размерности сигнального (или шумового) подпространства, а также сравнительно большая вычислительная сложность.

### Эффект взаимного влияния

Одним из условий в классическом анализе антенных решеток является исключение эффекта взаимного влияния (ВВ) – предполагается, что диаграммы направленности (ДН) всех антенных элементов идентичны. Обычно в расчетах принимается ДН изолированного элемента. На рис. 2,а представлен пример подобной диаграммы. Подобное приближение справедливо для антенных решеток с большим числом элементов. Однако для решетки с относительно небольшим количеством элементов ВВ оказывает более сильное влияние. За счет эффекта взаимного влияния искажаются ДН отдельных элементов (рис. 2,б). Как следствие, общая ДН решетки больше не является просто произведением коэффициента решетки и ДН изолированного элемента.

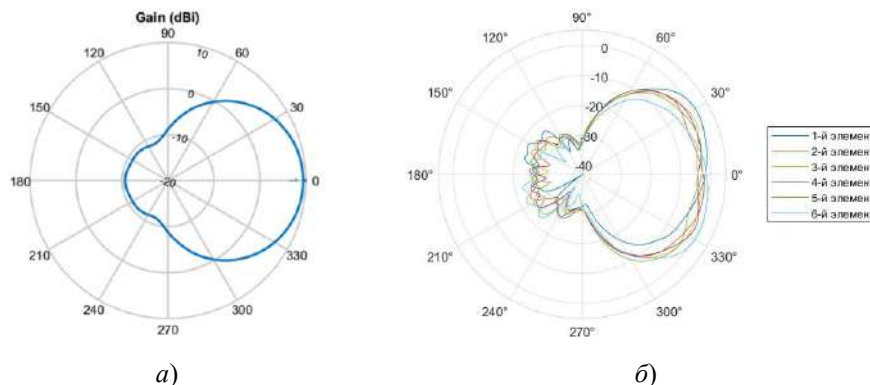


Рис. 2. Диаграммы направленности микрополосковой антенны:  
а – изолированного антенного элемента; б – с учетом взаимного влияния

Для проведения более приближенных к реальности расчетов требуется вычисление ДН для каждого отдельного элемента антенной решетки. Диаграмма направленности изолированного элемента представляет собой ДН одного антенного элемента в отсутствие других элементов решетки. Диаграмма направленности элемента с учетом взаимного влияния (парциальная ДН [9], или ДН элемента в составе АР) представляет собой ДН антенной решетки, в которой исследуемый элемент считается активным, а все остальные являются пассивными с отключенными выходами. Такой подход к вычислению ДН принято называть методом встроенного элемента (embedded element). Ключевым моментом является то, что вычисленная таким образом ДН отдельного элемента – это диаграмма направленности, учитывающая всю антенную решетку, включая рассеяние вблизи активного элемента.

В представленной выше модели цифрового пеленгатора учитывается сдвиг фаз в антенных элементах, вызванный формой антенной решетки. Однако при этом не учитывается взаимное влияние этих элементов. В связи с этим необходимо изменить модель таким образом, чтобы в ней учитывался фактор взаимного влияния АЭ, а именно ДН элементов в составе АР.

Для этого вначале была создана модель линейной антенной решетки. Моделирование проводилось согласно следующим параметрам:

- количество элементов решетки  $M = 4$ ;
- тип элемента – полосковая антенна;
- материал проводника – медь, диэлектрика – воздух;
- частота принимаемого сигнала – 5 ГГц.

После первичного расчета антенного элемента выполнялась оптимизация для того, чтобы максимизировать коэффициент усиления (КУ) и минимизировать параметр  $S_{11}$  при импедансе, равном 50 Ом. На рис. 3 представлены ДН изолированных элементов и элементов в составе решетки. На них отчетливо видно, как меняются ДН под действием эффекта взаимного влияния. Это особенно заметно для крайних элементов.

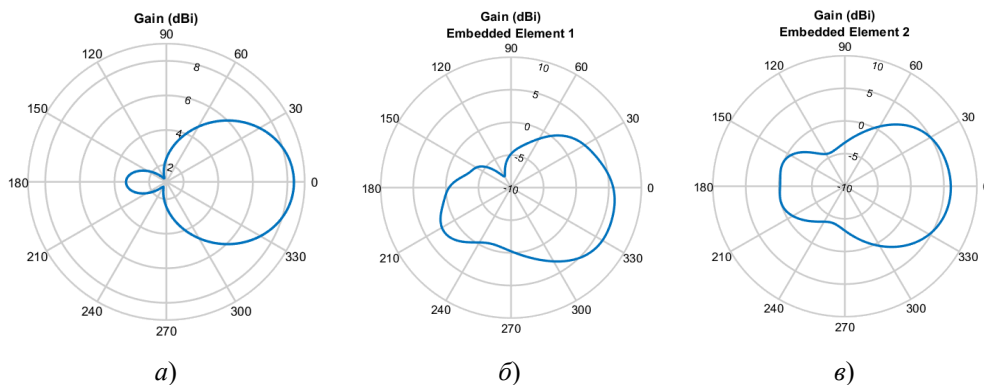


Рис. 3. Диаграммы направленности:  
а – изолированного элемента; б, в – элементов 1–2 в составе решетки

Далее была дополнена формула для нахождения матрицы сканирующих векторов (3–4). Ее элементы домножаются на значения диаграммы направленности каждого антенного элемента. В итоге выражение приняло следующий вид:

$$\bar{A}_{\text{модиф.}} = \begin{bmatrix} f_1(\theta_1) & f_1(\theta_2) & \dots & f_1(\theta_D) \\ f_2(\theta_1) \cdot A_2(\theta_1) & f_2(\theta_2) \cdot A_2(\theta_2) & \dots & f_2(\theta_D) \cdot A_2(\theta_D) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_M(\theta_1) \cdot A_M(\theta_1) & f_M(\theta_2) \cdot A_M(\theta_2) & \dots & f_M(\theta_D) \cdot A_M(\theta_D) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

А выражение (1) для сигнала, принятого  $m$ -м антенным элементом соответственно:

$$x_m(k) = A_m(\theta_1) \cdot f_m(\theta_1) \cdot s_1(k) + \dots + A_m(\theta_D) \cdot f_m(\theta_D) \cdot s_D(k) + n(k), \quad (10)$$

где  $f_m(\theta_D)$  – это значение диаграммы направленности  $m$ -го антенного элемента в направлении на  $D$ -й источник сигнала.

### Калибровка эффекта взаимного влияния

Для компенсации негативного воздействия эффекта взаимного влияния применяются специальные методы калибровки. Данные методы работают за счет дополнительной обработки принятого сигнала. Существующие методы можно разделить на четыре основные группы [10, 11]:

- методы зондирования. Основаны на использовании дополнительных калибровочных цепей и антенн-зондов. Матрица взаимного влияния в данном случае оценивается за счет измерения фазы и амплитуды сигналов от каждого антенного элемента при известных углах прихода радиосигналов;
- методы внутренних калибровочных цепей. Основаны на использовании специальных линий передачи, подключенных к каждому антенному элементу. Эти линии измеряют сигналы, принимаемые и передаваемые антенными элементами. Затем измеренные сигналы используются для расчета разности фаз и амплитуд между каналами элементов;
- методы взаимного влияния (mutual coupling method). Основаны на оценке взаимного влияния между всеми парами антенных элементов. Данные методы основаны том, что, зная взаимное влияние между парами антенных элементов решетки, можно вычислить общую калибровочную матрицу;
- методы обработки сигналов. Основаны на определении калибровочных матриц только из анализа принятых сигналов, например, за счет предварительно моделирования антенной решетки, или за счет алгоритмов автокалибровки.

Для моделирования был выбран метод калибровки, описанный в статьях [12, 13]. Рассмотрим принцип его работы. В рассматриваемом методе калибровочная матрица определяется посредством оценки соотношения между диаграммами направленности изолированных элементов и диаграммами элементов в составе решетки.

Как известно, диаграммы направленности антенн в составе решетки отличаются от диаграмм таких же антенн вне ее. Разница между ними обусловлена эффектом взаимного влияния. Диаграмма направленности изолированного элемента представляет собой ДН одного антенного элемента в отсутствие других элементов решетки и обозначается  $F_{из.}(\theta)$ . Диаграмма направленности элемента в составе решетки обозначается как  $F_{встр.}(\theta)$  и оценивается при условии, что остальные антенные элементы этой же решетки являются пассивными с отключенными выходами.

Для восстановления ДН изолированных элементов (т.е. компенсации взаимного влияния) используется следующее преобразование:

$$\begin{bmatrix} F_{из.1}(\theta_1) & \cdots & F_{из.1}(\theta_D) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{из.M}(\theta_1) & \cdots & F_{из.M}(\theta_D) \end{bmatrix} = \bar{C} \cdot \begin{bmatrix} F_{встр.1}(\theta_1) & \cdots & F_{встр.1}(\theta_D) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{встр.M}(\theta_1) & \cdots & F_{встр.M}(\theta_D) \end{bmatrix} \quad (11)$$

или

$$\bar{F}_{из.} = \bar{C} \bar{F}_{встр.}, \quad (12)$$

где  $\bar{C}$  – калибровочная матрица. Для определения калибровочной матрицы необходимо умножить обе части выражения (12) на матрицу, обратную  $\bar{F}_{из.}$ . Применяя метод наименьших квадратов, получаем

$$\bar{C} = \bar{F}_{встр.} \bar{F}_{из.}^H \left( \bar{F}_{из.} \bar{F}_{из.}^H \right)^{-1}, \quad (13)$$

где  $\bar{F}_{из.}^H$  – эрмитово сопряженная матрица.

Рассчитанная таким образом матрица  $\bar{C}$  может быть использована для калибровки принятого антенной решеткой сигнала:

$$\bar{X}_к = \bar{C} \bar{X}, \quad (14)$$

где  $\bar{X}$  – матрица принятого сигнала;  $\bar{X}_к$  – откалиброванная матрица.

Таким образом, процедура калибровки заключается в следующем:

- 1) нахождение изолированной и парциальной диаграмм направленности антенных элементов;

- 2) определение согласно (13) калибровочной матрицы;
- 3) калибровка принятого сигнала согласно (14).

Поскольку при расчете необходимо учитывать положение антенных элементов в решетке, то для линейной антенной решетки итоговые матрицы  $\overline{F}_{\text{пр}}$  и  $\overline{F}_{\text{из}}$  в формуле (13) примут следующий вид:

$$\overline{F}_{\text{пр}} = \begin{bmatrix} F_{\text{пр.1}}(\theta_1) & F_{\text{пр.1}}(\theta_2) & \dots & F_{\text{пр.1}}(\theta_D) \\ F_{\text{пр.2}}(\theta_1) \cdot e^{j\pi \sin \theta_1} & F_{\text{пр.2}}(\theta_2) \cdot e^{j\pi \sin \theta_2} & \dots & F_{\text{пр.2}}(\theta_D) \cdot e^{j\pi \sin \theta_D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{\text{пр.M}}(\theta_1) \cdot e^{j(M-1)\pi \sin \theta_1} & F_{\text{пр.M}}(\theta_2) \cdot e^{j(M-1)\pi \sin \theta_2} & \dots & F_{\text{пр.M}}(\theta_D) \cdot e^{j(M-1)\pi \sin \theta_D} \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$\overline{F}_{\text{из}} = \begin{bmatrix} F_{\text{из.1}}(\theta_1) & F_{\text{из.1}}(\theta_2) & \dots & F_{\text{из.1}}(\theta_D) \\ F_{\text{из.2}}(\theta_1) \cdot e^{j\pi \sin \theta_1} & F_{\text{из.2}}(\theta_2) \cdot e^{j\pi \sin \theta_2} & \dots & F_{\text{из.2}}(\theta_D) \cdot e^{j\pi \sin \theta_D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{\text{из.M}}(\theta_1) \cdot e^{j(M-1)\pi \sin \theta_1} & F_{\text{из.M}}(\theta_2) \cdot e^{j(M-1)\pi \sin \theta_2} & \dots & F_{\text{из.M}}(\theta_D) \cdot e^{j(M-1)\pi \sin \theta_D} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

### Принципы построения программно-аппаратной модели

Изучение системы пеленгации было решено проводить по методу совмещенного программно-аппаратного моделирования. При данном методе часть расчетов модели происходит на внешнем устройстве. В качестве внешнего устройства авторами была использована отладочная плата ПЛИС.

В разработке программно-аппаратной модели можно выделить следующие этапы:

- 1) подготовка Simulink модели;
- 2) перевод входных данных в формат с фиксированной запятой для упрощения схемы и экономии ресурсов ПЛИС;
- 3) настройка инструмента HDL Coder для оптимизации кода под конкретную ПЛИС;
- 4) создание дополнительного кода для передачи данных от компьютера на ПЛИС и обратно с помощью инструмента FIL Wizard;
- 5) генерация HDL кода.

Обмен данными между компьютером и отладочной платой осуществлялся за счет технологии FPGA-in-the-loop. В этом режиме данные в реальном времени передаются на ПЛИС, обрабатываются, а результат обработки передается обратно в модель. Создание модели с поддержкой технологии FPGA-in-the-loop осуществляется с помощью инструмента FIL Wizard (рис. 4).

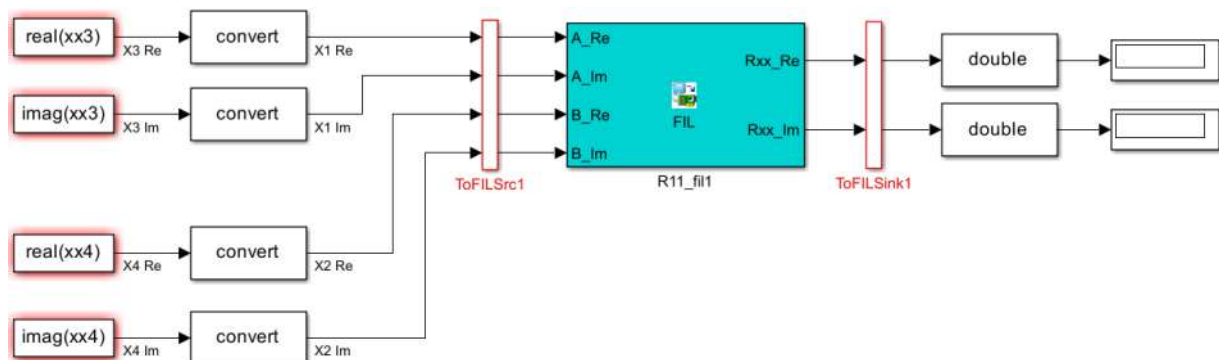


Рис. 4. Пример модели с поддержкой FPGA-in-the-loop

При запуске инструмент FIL Wizard автоматизированно выполняет следующие операции:

- 1) генерирует системный FIL-объект, который представляет HDL код. На рис. 4 представлен пример модели с сгенерированным FIL-объектом (выделен цветом);
- 2) обеспечивает синтез, логическое отображение, размещение и генерацию файлов прошивки;
- 3) организует канал связи с отладочной платой. Обмен данными может быть организован через интерфейсы JTAG, Ethernet, PCI Express или USB Ethernet;
- 4) загружает прошивку на ПЛИС;

- 5) организует сигналы синхронизации между Simulink и отладочной платой для обеспечения корректности и синхронности работы модели;
- 6) передает данные из Simulink или MATLAB на ПЛИС;
- 7) получает данные от ПЛИС (рис. 5).

### Разработка модели пеленгатора с системой калибровки

Подробно вопрос моделирования цифрового блока пеленгатора был рассмотрен ранее в работах [14, 15]. В данной статье был сделан упор на разработку блока калибровки и интеграцию его в готовую модель. На ПЛИС был перенесен объединенный модуль расчета корреляционной матрицы с предварительной калибровкой.

Создание модели антенной решетки, расчет принятых сигналов, определение ДН антенных элементов и калибровочной матрицы осуществлялось на компьютере. Рассчитанная заранее калибровочная матрица хранится в памяти ПЛИС.

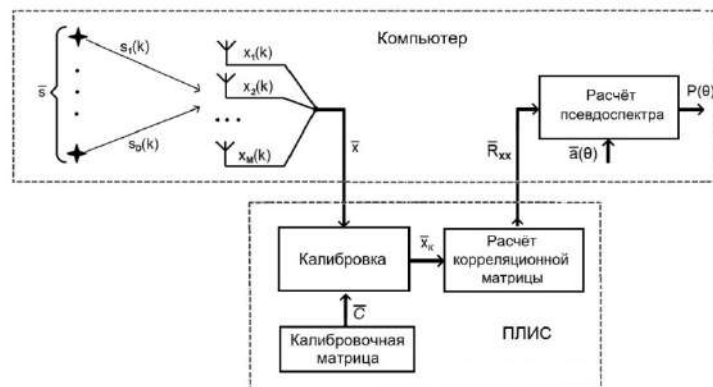


Рис. 5. Схема модели для программно-аппаратного моделирования

Процесс работы модели следующий:

- 1) на компьютере происходит моделирование антенной решетки и вычисление изолированных и парциальных диаграмм направленности. На их основе согласно выражениям (13), (15), (16) вычисляется калибровочная матрица;
- 2) далее происходит генерация падающих сигналов и вычисление сигналов на выходе АР;
- 3) на вход аппаратной части поступает принятый АР сигнал. В ПЛИС происходит калибровка сигнала и расчет корреляционной матрицы, которая возвращается на компьютер;
- 4) на компьютере согласно методу MUSIC рассчитывается псевдоспектр и отображается его график.

В качестве аппаратной платформы для совмещенной модели была выбрана отладочная плата XUP Alys на базе ПЛИС Spartan-6 LX45. Создание модели проводилось в среде Simulink. Обмен данными между компьютером и отладочной платой осуществлялся за счет технологии FPGA-in-the-loop.

Были приняты следующие условия моделирования:

- сканирование осуществляется по азимуту в пределах минус  $90^\circ$  –  $+90^\circ$ , при значении угла места равном  $90^\circ$ ;
- на антенную решетку поступают два сигнала с разных направлений;
- число отсчетов цифрового сигнала  $N$ , на основе которых проводятся вычисления, равняется 100.

Рассмотрим подробнее часть модели, реализованную на ПЛИС. Эта система состоит из двух частей – блок калибровки и блок расчета корреляционной матрицы. На вход схемы подается четыре комплексных сигнала от антенных элементов. Далее происходит преобразование из формата с плавающей запятой в формат с фиксированной. На ПЛИС сигнал поступает в формате `sfixed(1,16,10)` – 16 разрядов, 1-й разряд знаковый, 10 разрядов после запятой. После проведения расчетов на компьютер возвращаются значения корреляционной матрицы, которые далее подвергаются обратному преобразованию в формат с плавающей запятой.

Изучим блок калибровки. Согласно формуле (14) откалиброванный сигнал  $X_k(n)$  от антенного элемента под номером  $j$  в момент времени  $n$  представляет собой

$$x_{K,j}(n) = \sum_{i=1}^M c_{ji} x_i(n), \quad (17)$$

где  $c_{ji}$  – элемент калибровочной матрицы;  $x_i(n)$  – некалиброванный сигнал от элемента под номером  $i$ ;  $M$  – число элементов АР.

Схема, выполняющая данное математическое выражение, представлена на рис. 6. На ее вход поступают все сигналы от антенных элементов (А), а также коэффициенты калибровочной матрицы (Б). На выход схемы (Г) проступает откалиброванный сигнал.

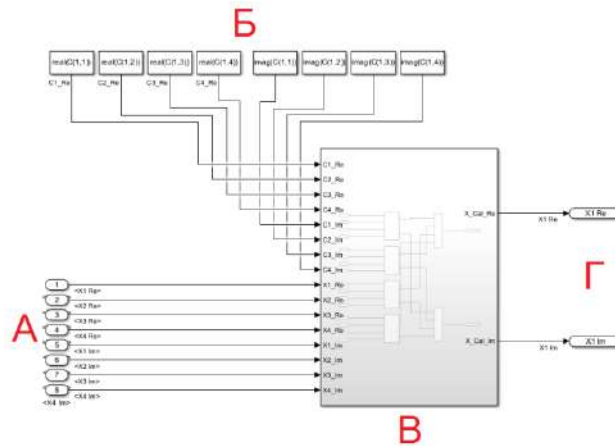


Рис. 6. Схема калибровки одного канала АР

Блок математических операций (В), изображенный на рис. 7, состоит из четырех комплексных умножителей (Д) и двух четырехвыходовых сумматоров (Е). Схема комплексного умножителя представлена на рис. 8.

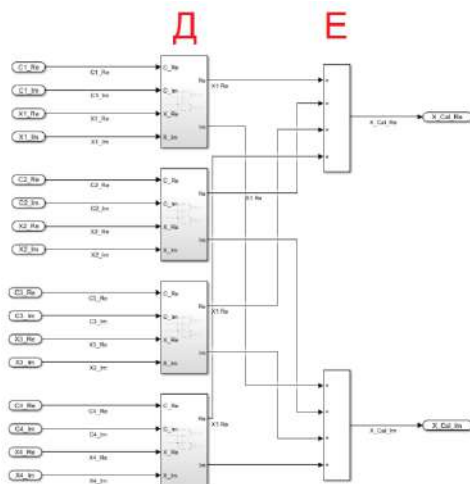


Рис. 7. Блок математических операций

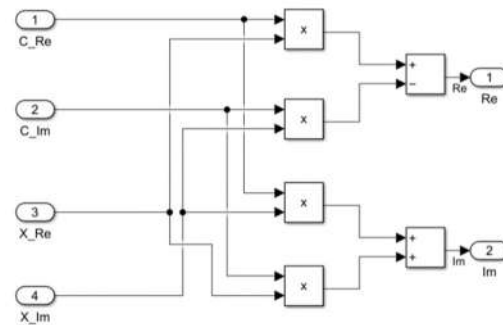


Рис. 8. Блок комплексного умножения

Рассмотрим структуру блока расчета корреляционной матрицы. Для расчета одного элемента была составлена следующая схема Simulink (рис. 9). На вход схемы поступают два комплексных числа, после чего последовательно происходит их комплексное умножение, суммирование с накоплением и деление на число отсчетов  $N$  (в данном случае использовалось 100 отсчетов сигнала). На полный расчет суммарно уходит не менее  $N$  тактов.

Далее была составлена общая схема для расчета матрицы (рис. 10). Матрица для  $M$  входных сигналов состоит из  $M^2$  элементов. Поскольку в модели была применена четырехэлементная антенная решетка и на вход цифрового блока поступает четыре сигнала, то общая схема состоит из 16 блоков.

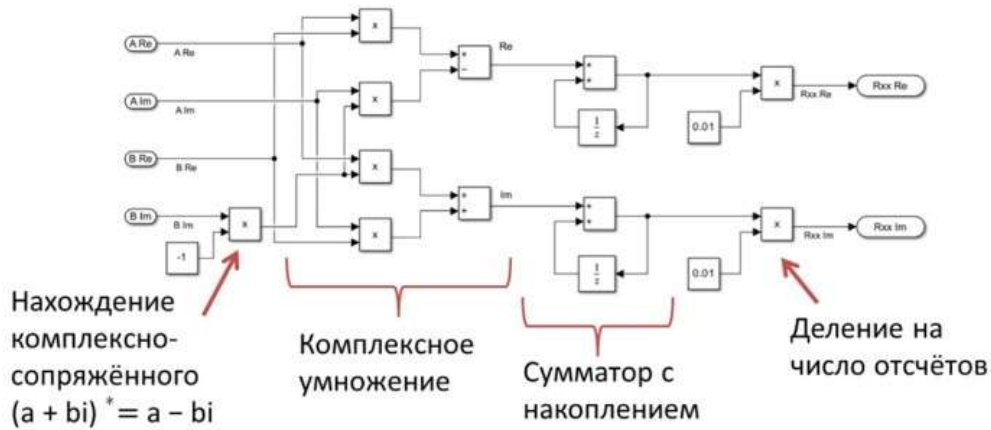


Рис. 9. Схема для расчета одного элемента корреляционной матрицы

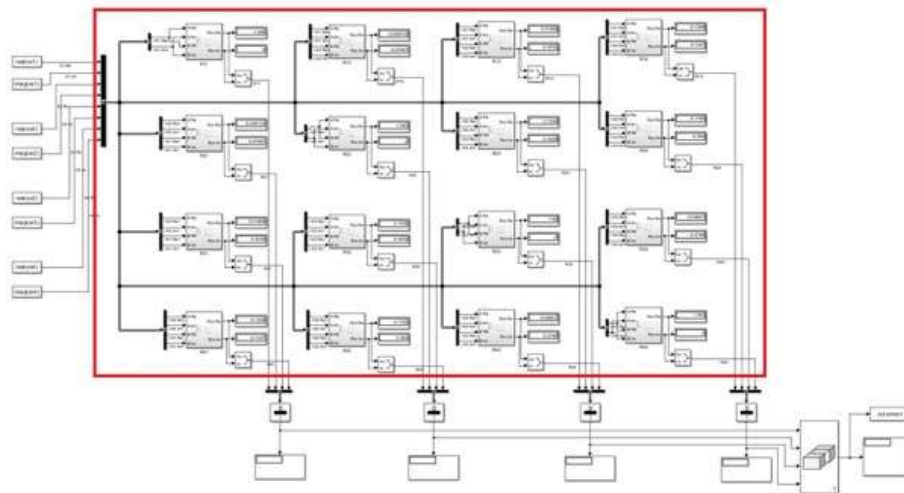
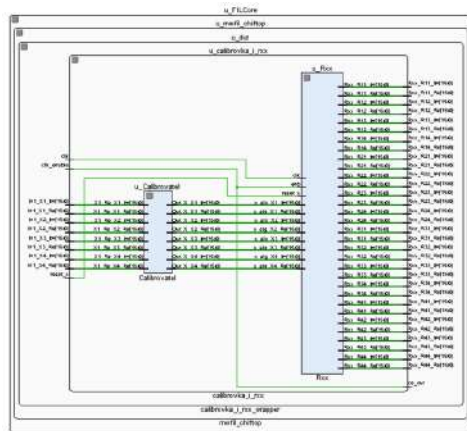
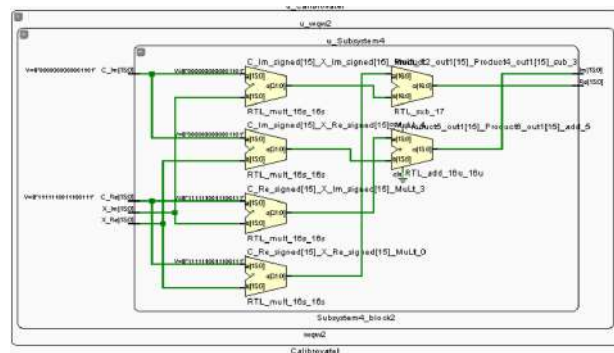


Рис. 10. Блок расчета корреляционной матрицы

Кратко рассмотрим сгенерированный HDL-код. Для анализа использовалось ПО ISE Design Tool. На рис. 11,а представлены блок калибровки с равным количеством входов и выходов и блок расчета корреляционной матрицы. На рис. 11,б представлен блок математических операций, рассмотренный ранее на рис. 8. Можно различить четыре блока комплексного умножения и элементы-сумматоры. На рис. 11,в изображена структура блока комплексного умножения.

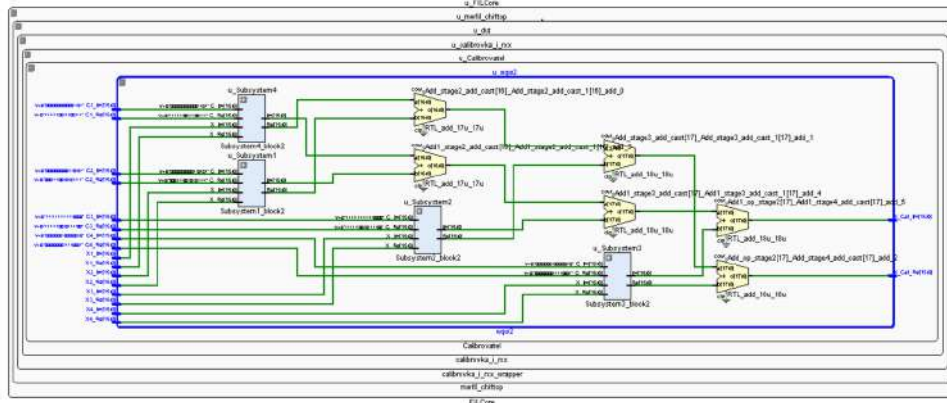


а)



б)

Рис. 11. Структура итогового проекта:  
а – блоки калибровки и расчета корреляционной матрицы



б)

Рис. 11. Структура итогового проекта (окончание):

б – блок математических операций; в – блок комплексного умножения

### Результаты и обсуждение

Рассмотренный алгоритм калибровки основан на идее «восстановления» изолированных диаграмм направленности. Как видно из формулы (12), перемножив элементы матрицы калибровки и матрицы ДН элементов в составе решетки, можно получить ДН изолированных элементов. На рис. 12 представлены рассчитанные таким методом диаграммы направленности.

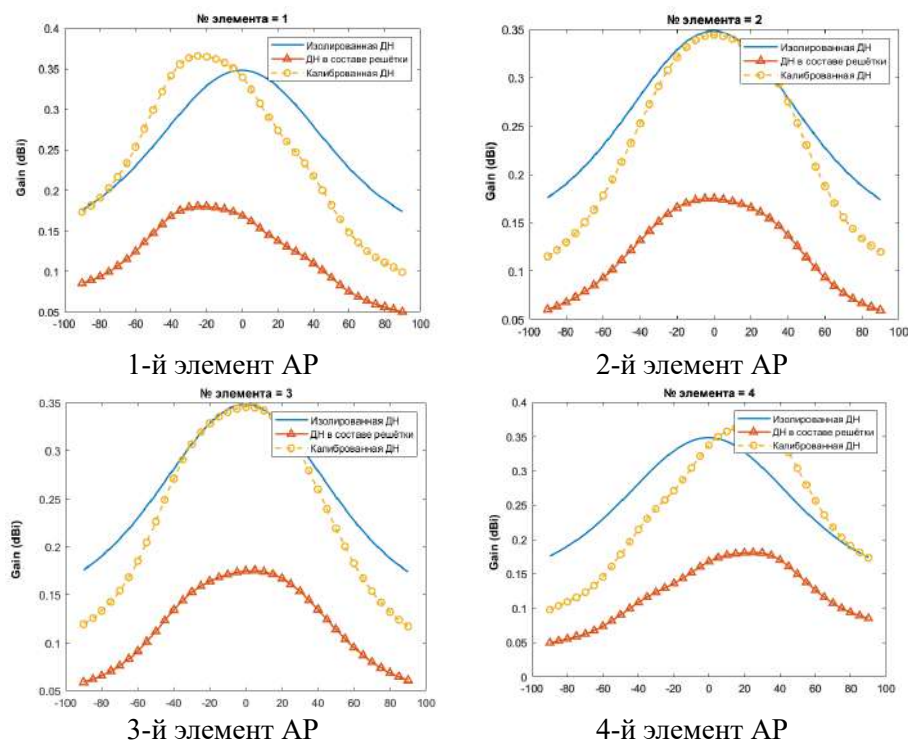


Рис. 12. Диаграммы направленности изолированных элементов, элементов в составе решетки и после проведения калибровки

Рассмотрим полученные диаграммы. Видно, что форма калиброванной ДН в целом стремится к форме изолированной, однако степень их соответствия разнится между элементами. Лучше всего восстановились ДН центральных элементов, что объясняется меньшей искаженностью их формы под действием взаимного влияния по сравнению с ДН крайних элементов. Общей особенностью для всех элементов является неполное восстановление формы ДН. Это объясняется применением метода наименьших квадратов при расчете калибровочной матрицы (13). Решить данное уравнение

напрямую невозможно, так как требуется найти обратную матрицу  $\overline{F}_{\text{встр.}}^{-1}$ , которая является прямоугольной. В связи с этим приходится прибегать к нахождению псевдообратной матрицы и аппроксимации по методу наименьших квадратов.

После завершения разработки схемы и генерации HDL-кода был проведен подробный анализ потребляемых ресурсов с помощью пакета ПО ISE Design Tool. В табл. 1 представлена итоговая информация по потребляемым логическим ресурсам микросхемы ПЛИС.

Таблица 1

Потребляемые логические ресурсы

| Ресурс  | Процент использования, % |
|---------|--------------------------|
| LUT     | 56                       |
| Slice   | 65                       |
| IO      | 12                       |
| RAMB16  | 18                       |
| DSP48A1 | 100                      |

Как можно видеть, наибольшее потребление приходится на блоки цифровой обработки сигналов DSP48A1 – используются все 100 % имеющихся ресурсов. Это вызвано тем, что подавляющее большинство операций в алгоритме пеленгации – это умножение и сложение, которые в первую очередь реализуются именно на блоках DSP48A1.

Для определения корректности работы полученной системы было проведено сравнение полностью программной и совмещенной модели. Программная модель алгоритмически полностью повторяет модель на ПЛИС и использует те же сигналы, однако отличается от аппаратной модели использованием формата данных с плавающей запятой. Всего было проведено несколько циклов моделирования с разными положениями источников радиосигнала. На рис. 13 представлен один из полученных графиков псевдоспектра. Кроме того, для сравнения на рис. 14, 15 представлен псевдоспектр, полученный при тех же начальных условиях, но без калибровки.

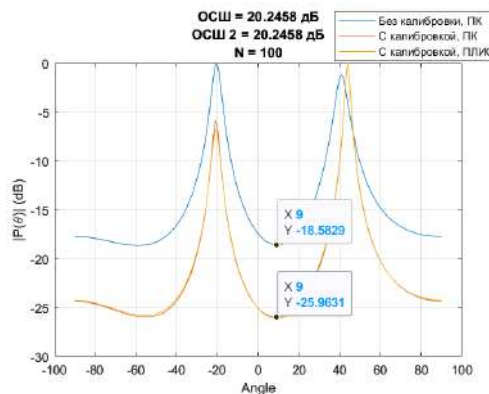


Рис. 13. Сравнение графиков для модели без калибровки, с калибровкой на ПК и с калибровкой на ПЛИС

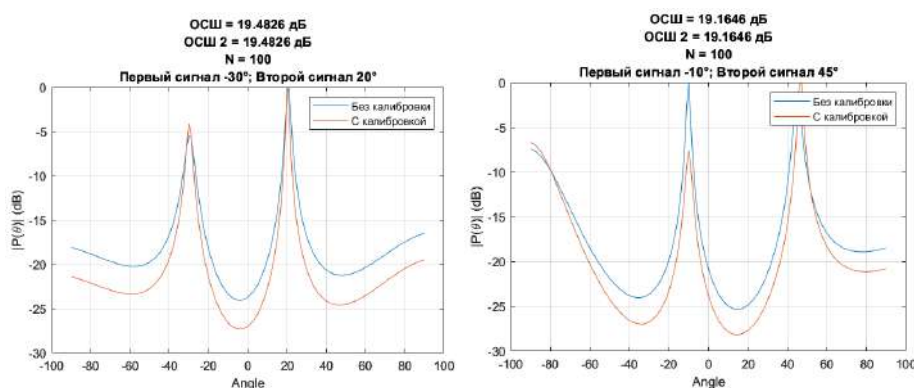


Рис. 14. Графики псевдоспектра при одинаковой мощности и разном положении источников сигнала

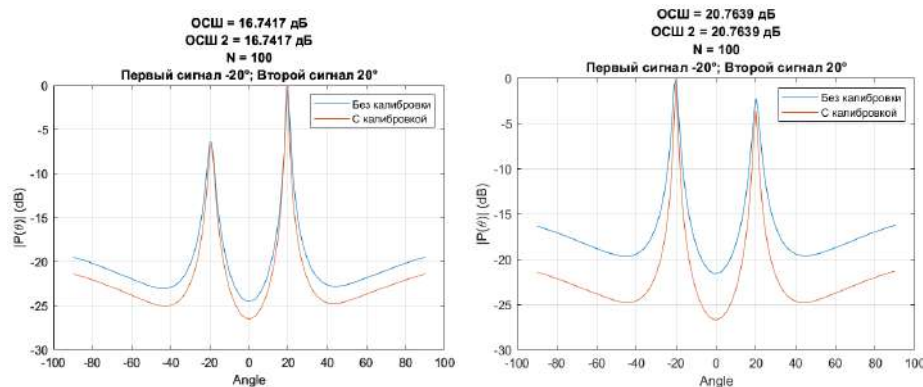


Рис. 15. Графики псевдоспектра при одинаковом положении источников сигнала и разной мощности

Разберем полученные результаты.

1. Формы графиков для полностью программной и совмещенной аппаратно-программной моделей достаточно близко совпадают, разница между ними не превышает 1 дБ. Присутствующие небольшие различия являются следствием округления данных в совмещенной модели при переводе их из формата с плавающей запятой в формат с фиксированной и обратно.

2. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности примененного метода калибровки – на графиках наблюдается увеличение разрешающей способности алгоритмов пеленгации. Это улучшение сохраняется при разных углах прихода сигнала и при изменении ОСШ. Выигрыш в разрешающей способности при значениях ОСШ не меньше 20 дБ составляет от 3 до 10 дБ.

### Заключение

В работе были рассмотрены вопросы аппаратно-программного моделирования цифровых систем пеленгации на базе алгоритмов со сверхразрешением. Представлены общие принципы работы алгоритмов пеленгации. Рассмотрены эффект взаимного влияния элементов антенных решеток и его воздействие на результаты оценки угла прихода сигнала, а также приведена методика учета эффекта при моделировании принимаемого решеткой сигнала.

Разработаны две совмещенные аппаратно-программные модели: для цифрового блока пеленгатора и для блока калибровки. Для оценки работы систем было проведено сравнение полностью программных и совмещенных моделей. Испытания проводились для разных начальных условий. Полученные результаты демонстрируют корректность работы полученных аппаратно-программных моделей, а также свидетельствуют об эффективности рассмотренного метода калибровки и разработанного блока калибровки.

Для обеих моделей был проведен анализ потребляемых ресурсов с помощью пакета ПО ISE Design Tool. В данной работе для создания моделей применялись схемы с параллельной структурой вычислений. Этим объясняется такой высокий процент использованных ресурсов ПЛИС, особенно блоков ЦОС. Кроме того, использование параллельной структуры накладывает ограничение на число элементов решетки – с ростом их числа резко возрастет и процент использованных ресурсов. Так, например, число блоков умножения – суммирования в схеме расчета корреляционной матрицы (см. рис. 8, 9) равно квадрату количества антенных элементов.

Решением данной проблемы может служить использование схем с последовательной структурой вычислений (также называемой конвейерной структурой). Данный подход позволяет в несколько раз снизить число потребляемых ресурсов за счет выполнения однотипных операций для разных потоков данных в одном и том же блоке. Например, в предельном случае для вычисления корреляционной матрицы любых размеров достаточно одного блока умножения-суммирования и двух буферных блоков достаточных размеров. Однако последовательный подход обладает собственными недостатками. Прежде всего, значительно падает скорость вычислений. Для многих приложений в современной технике (например, для локализации положения абонента в системах связи) скорость обработки данных является критическим параметром. Кроме того, при использовании последовательного подхода возникает необходимость в промежуточном хранении данных в буферах, для реализации которых также потребляются ресурсы микросхемы ПЛИС. Из-за этого экономия ресурсов снижается.

Решением сложившейся проблемы может стать разработка цифрового блока с параллельно-последовательной структурой. В данном случае весь процесс вычислений представляется в виде последовательных этапов (так называемых ступеней конвейера), в каждом из которых вычисления проходят параллельно. Применительно к структуре цифрового блока пеленгатора это может выражаться например, в параллельном вычислении всех элементов только одного столбца корреляционной матрицы. В таком случае отсчеты сигналов от антенной решетки и уже рассчитанные значения будут храниться в блоках памяти. Данный подход позволит достигнуть компромисса между требующимися ресурсами и скоростью обработки данных.

### Список литературы

1. Ünlerşen M., Yaldız E., Imeci S. FPGA based fast Bartlett DoA estimator for ULA antenna using parallel computing // *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*. 2018. № 33. P. 450–459.
2. Abusultan M., Harkness S., Raymond J. [et al.]. Design and test of FPGA-based direction-of-arrival algorithms for adaptive array antennas // *Aerospace Conference. IEEE*. 2011. P. 1–8. doi: 10.1109/AERO.2011.5747309
3. Глушанков Е. И., Кирик Д. И., Коровин К. О. [и др.] Реализация алгоритма адаптивного диаграммообразования на ПЛИС // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023. Т. 11, № 1 (40). С. 19–20. doi 10.26102/2310-6018/2023.40.1.025
4. Bartlett M. S. *An Introduction to Stochastic Processes with Special References to Methods and Applications*. New York : Cambridge University Press, 1961. 388 с.
5. Johnson D. H. The Application of Spectral Estimation Methods to Bearing Estimation Problems // *Proceedings of the IEEE*. № 70. P. 1018–1028. doi: 10.1109/PROC.1982.12430
6. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // *Proceedings of the IEEE*. 1969. Vol. 57, № 8. С. 1408–1418. doi: 10.1109/PROC.1969.7278
7. Van Trees H. L. *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. New York : John Wiley & Sons, 2002. 1472 с.
8. Schmidt R. O. Multiple emitter location and signal parameter estimation // *IEEE Transactions on Antennas Propagation*. 1986. Vol. AP-34, № 3. P. 271–280. doi: 10.1109/TAP.1986.1143830
9. Бажанова О. В., Кононов А. А., Смусева К. В. [и др.] Исследование коэффициентов взаимного влияния в двухполяризационных антенных решетках // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2023. Т. 26, № 4. С. 78–87. doi: 1810-3189.2023.26.4.78-87
10. Seker I. Calibration methods for phased array radars // *Defense, Security and Sensing*. 2013. doi: 10.1117/12.2015694
11. Zorkun A. E., Salas-Natera M. A., Pinto A. A. [et al.]. A Mutual Coupling-Based Full Self-Online Calibration Method for Antenna Arrays in Uplink // *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. 2024. № 4. P. 1026–1040. doi: 10.1109/OJAP.2024.3406067
12. Huang Q., Zhou H., Bao J., Shi X. Accurate DOA Estimations Using Microstrip Adaptive Arrays in the Presence of Mutual Coupling Effect // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2013. P. 8. doi: 10.1155/2013/919545
13. Huang Q., Zhou H., Bao J., Shi X. Mutual Coupling Calibration for Microstrip Antenna Arrays via Element Pattern Reconstruction Method // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2014. № 13. P. 51–54. doi: 10.1109/LAWP.2013.2296073
14. Жигулин В. А. Разработка модели цифрового радиопеленгатора на базе алгоритма Бартлетта по методу совмещенного программно-аппаратного моделирования на ПЛИС // *Информатика: проблемы, методы, технологии : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф. им. Э. К. Алгаинова (г. Воронеж, 14–15 февраля 2024 г.)*. Воронеж : Воронежский государственный университет, 2024. С. 261–271.
15. Пешков И. В., Жигулин В. А., Фортунова Н. А. Моделирование процесса радиопеленгации цифровыми антенными решетками с учетом эффекта взаимного влияния антенных элементов // *Надежность и качество сложных систем*. 2023. № 4. С. 40–52. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-4

### References

1. Ünlerşen M., Yaldız E., Imeci S. FPGA based fast Bartlett DoA estimator for ULA antenna using parallel computing. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*. 2018;(33):450–459.
2. Abusultan M., Harkness S., Raymond J. et al. Design and test of FPGA-based direction-of-arrival algorithms for adaptive array antennas. *Aerospace Conference. IEEE*. 2011:1–8. doi: 10.1109/AERO.2011.5747309
3. Glushankov E.I., Kirik D.I., Korovin K.O. et al. Implementation of the algorithm of adaptive diagramming on FPGAs. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, optimization and information technologies*. 2023;11(1):19–20. (In Russ.). doi 10.26102/2310-6018/2023.40.1.025
4. Bartlett M.S. *An Introduction to Stochastic Processes with Special References to Methods and Applications*. New York: Cambridge University Press, 1961:388.

5. Johnson D.H. The Application of Spectral Estimation Methods to Bearing Estimation Problems. *Proceedings of the IEEE*. 1982;70:1018–1028. doi: 10.1109/PROC.1982.12430
6. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*. 1969;57(8):1408–1418. doi: 10.1109/PROC.1969.7278
7. Van Trees H.L. *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. New York: John Wiley & Sons, 2002:1472.
8. Schmidt R.O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*. 1986;AP-34(3):271–280. doi: 10.1109/TAP.1986.1143830
9. Bazhanova O.V., Kononov A.A., Smuseva K.V. et al. Investigation of mutual influence coefficients in bipolarized antenna arrays. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy = Physics of wave processes and radio engineering systems*. 2023;26(4):78–87. (In Russ.). doi: 1810-3189.2023.26.4.78-87
10. Seker I. Calibration methods for phased array radars. *Defense, Security and Sensing*. 2013. doi: 10.1117/12.2015694
11. Zorkun A.E., Salas-Natera M.A., Pinto A.A. et al. A Mutual Coupling-Based Full Self-Online Calibration Method for Antenna Arrays in Uplink. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. 2024;(4):1026–1040. doi: 10.1109/OJAP.2024.3406067
12. Huang Q., Zhou H., Bao J., Shi X. Accurate DOA Estimations Using Microstrip Adaptive Arrays in the Presence of Mutual Coupling Effect. *International Journal of Antennas and Propagation*. 2013;8. doi: 10.1155/2013/919545
13. Huang Q., Zhou H., Bao J., Shi X. Mutual Coupling Calibration for Microstrip Antenna Arrays via Element Pattern Reconstruction Method. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2014;(13):51–54. doi: 10.1109/LAWP.2013.2296073
14. Zhigulin V.A. Development of a digital radio direction finder model based on the Bartlett algorithm using the method of combined software and hardware modeling on FPGAs. *Informatika: problemy, metody, tekhnologii: materialy XXIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. im. E.K. Algazinova (g. Voronezh, 14–15 fevralya 2024 g.) = Informatics: problems, methods, technologies : materials of the XXIV International scientific and practical conference named after E.K. Algazinov (Voronezh, February 14–15, 2024)*. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, 2024:261–271. (In Russ.)
15. Peshkov I.V., Zhigulin V.A., Fortunova N.A. Modeling of the radio direction finding process with digital antenna arrays, taking into account the effect of mutual influence of antenna elements. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(4):40–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-4

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Илья Владимирович Пешков

кандидат физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры агроинженерии, мехатронных  
и радиоэлектронных систем,  
Елецкий государственный университет  
имени И. А. Бунина  
(Россия, Липецкая обл., г. Елец, ул. Коммунаров, 28)  
E-mail: ilvpeshkov@gmail.com

#### Владимир Александрович Жигулин

аспирант,  
Елецкий государственный университет  
имени И. А. Бунина  
(Россия, Липецкая обл., г. Елец, ул. Коммунаров, 28)  
E-mail: obi4n@yandex.ru

#### Наталья Александровна Фортунова

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой агроинженерии,  
мехатронных и радиоэлектронных систем,  
Елецкий государственный университет  
имени И. А. Бунина  
(Россия, Липецкая обл., г. Елец, ул. Коммунаров, 28)  
E-mail: fortunova.nata@mail.ru

#### Ilya V. Peshkov

Candidate of physical and mathematical sciences,  
associate professor, associate professor  
of the sub-department of agroengineering,  
mechatronic and radioelectronic systems,  
Yelets State University named after I.A. Bunin  
(28 Kommunarov street, Yelets,  
Lipetsk region, Russia)

#### Vladimir A. Zhigulin

Postgraduate student,  
Yelets State University named after I.A. Bunin  
(28 Kommunarov street, Yelets,  
Lipetsk region, Russia)

#### Natalia A. Fortunova

Candidate of technical sciences, associate professor,  
head of the sub-department of agroengineering,  
mechatronic and radioelectronic systems,  
Yelets State University named after I.A. Bunin  
(28 Kommunarov street, Yelets,  
Lipetsk region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 28.08.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 23.09.2024**

**Принята к публикации/Accepted 16.09.2024**

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

## DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 378.4:004

doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-6

### СИСТЕМА АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ ПО ДАННЫМ ЕГЭ И ЕГО НЕЧЕТКАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ

К. В. Бухенский<sup>1</sup>, Т. А. Львова<sup>2</sup>, В. В. Миронов<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина, Рязань, Россия

<sup>1</sup> bukhenky.k.v@rsreu.ru, <sup>2</sup> lvovatl@yandex.ru, <sup>3</sup> mironov1vv@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Цель статьи – ознакомить российскую научную и педагогическую общественность с новым наукометрическим методом качественного анализа знаний у студентов и школьников по данным ЕГЭ, продемонстрировать его характерные свойства и опыт применения. *Материалы и методы.* Идея базируется на ранних статьях авторов, посвященных созданию новых наукометрических индексов, и одновременно содержит существенно новые элементы. В реальном времени происходит сбор данных, статистический анализ и усреднение данных, кластеризация данных на основе нечеткой логики, натурная апробация методов, анализ результатов и выводов. Усреднение субъективных данных позволяет придать выводам устойчивый, объективный характер. *Результаты.* Вводятся новые наукометрические характеристики научного мероприятия: 1) локальный индекс знаний студенческих групп по данным ЕГЭ и мера доверия к этому параметру; 2) на основе локальных индексов вводится индекс знаний среди студентов по вузу в целом. Проведено нечеткое ранжирование уровня знаний как для групп, так и для вуза в целом. На основе данных об индексе знаний определяются наиболее знающие студенты, создаются ядро, хвост и подвал знаний в вузе и на их основе вычисляется наукометрический *M*-индекс знаний вуза – качественный аналог авторского обобщения «статистического» *h*-индекса Хирша. По значениям индекса *M* в рамках теории нечетких множеств предложено ранжирование вуза в качественных категориях: «высокие знания», «хорошие знания», «удовлетворительные знания», «слабые знания». *Выводы.* Создан алгоритм и на его основе программный комплекс «ЗНАНИЕ – СИЛА», который в реальном времени получает данные о ЕГЭ от студентов, в реальном времени обрабатывает эти данные и выдает числовые значения индексов знаний как для отдельных групп участников, так и для вуза в целом. Создан новый метод объективного анализа математических знаний групп студентов. Метод апробирован, вызвал интерес и одобрение в научной и педагогической среде и получил предложения по его анонсированию и распространению.

**Ключевые слова:** новый наукометрический индекс, обработка данных ЕГЭ, мера доверия к информации, нечеткое ранжирование уровня знаний

Для цитирования: Бухенский К. В., Львова Т. Л., Миронов В. В. Система анализа качества математических знаний студентов по данным ЕГЭ и его нечеткая кластеризация // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 57–67. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-6

## THE SYSTEM OF ANALYZING THE QUALITY OF MATHEMATICAL KNOWLEDGE OF STUDENTS ACCORDING TO THE UNIFIED STATE EXAM AND ITS FUZZY CLUSTERING

K.V. Bukhenskiy<sup>1</sup>, T.L. Lvova<sup>2</sup>, V.V. Mironov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia

<sup>1</sup> bukhenky.k.v@rsreu.ru, <sup>2</sup> lvovatl@yandex.ru, <sup>3</sup> mironovlvv@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The purpose of the article is to familiarize the Russian scientific and pedagogical community with the new scientometric method of qualitative analysis of knowledge among students and schoolchildren according to the Unified State Exam, to demonstrate its characteristic properties and application experience. *Materials and methods.* The idea is based on the authors' early articles on the creation of new scientometric indexes and at the same time contains significantly new elements. Real-time data collection, statistical analysis and averaging of data, clustering of data based on fuzzy logic, field testing of methods, analysis of results and conclusions take place. The averaging of subjective data makes it possible to give conclusions a stable, objective character. *Results.* New scientometric characteristics of a scientific event are being introduced: 1) a local index of knowledge of student groups according to the Unified State Exam and a measure of confidence in this parameter; 2) based on local indexes, an index of knowledge among students at the university as a whole is introduced. An indistinct ranking of the level of knowledge was carried out, both for groups and for the university as a whole. Based on the data on the knowledge index, the most knowledgeable students are determined, the core, tail and basement of knowledge in the university are created, and based on them, the scientometric M-index of university knowledge is calculated – a qualitative analogue of the author's generalization of the "statistical" Hirsch h-index. According to the M data, within the framework of fuzzy set theory, the university is ranked in qualitative categories: "high knowledge", "good knowledge", "satisfactory knowledge", "weak knowledge". *Conclusions.* An algorithm has been created and based on it, the ZNANIE – SILA software package, which receives data on the Unified State Exam from students in real time, processes this data in real time and outputs numerical values of knowledge indices for individual groups of participants and for the university as a whole. A new method of objective analysis of mathematical knowledge of groups of students has been created. The method has been tested, aroused interest and approval in the scientific and pedagogical community, and received proposals for its announcement and dissemination.

**Keywords:** new scientometric index, USE data processing, measure of confidence in information, indistinct ranking of the level of knowledge

**For citation:** Bukhenskiy K.V., Lvova T.L., Mironov V.V. The system of analyzing the quality of mathematical knowledge of students according to the unified state exam and its fuzzy clustering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):57–67. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-6

### Введение

С началом реформы российской науки (Федеральный закон № 202-ФЗ от 4 декабря 2006 г. «О внесении изменений в Федеральный закон «О науке и государственной научно-технической политике» и Федеральный закон «Об архивном деле в Российской Федерации») в научный обиход прочно входит понятие и термин «наукометрия» (от англ. *scientometrics*). С появлением наукометрических данных (и зачастую на их основе) компетентные лица на «законных основаниях» стали оценивать результативность работы отдельных ученых и научных коллективов. Постепенно наукометрия в России становится признанной сферой науки. Тот факт, что ее научные результаты могут трактоваться так или иначе, не смогли остановить ее стремительного продвижения.

### Обзор литературы

Прежде всего необходимо определиться с содержанием понятия «наукометрия». Так уж сформировалось, что наукометрия имеет две составные части. С одной стороны, она функционирует как подотрасль информатики. Основные исследования включают количественные измерения влияния

научных работ и (или) научных изданий (журналов, сборников, препринтов) для последующего использования таких измерений (точнее, их осмыслений) в контексте политики и управления в области науки. Наблюдается определенное и порою значительное совпадение наукометрии с другими научными областями, такими как информационные системы, информационно-коммуникативные технологии, информатизация образования и науки, политология (в части связи науки и политики), социология науки, метанаука (или универсальная наука, что обосновывает и изучает общую часть различных наук на основе общего для них одного метаязыка – языка, описывающего языки сразу всех этих наук, называемых объектными языками). С другой стороны, наукометрия – это область науковедения, проводящая исследование различных наук количественными методами (научными срезами), изучающая эволюцию (или революционные изменения) науки через многочисленные измерения (количество статей опубликованных в данный период времени, их цитируемость и т.д.) и их статистическую обработку. С деталями вопроса и более обще с состоянием дел в российской наукометрии можно ознакомиться по обзорным работам [1–3].

Одновременно объективные запросы наукометрии породили новые идеи, которые бы расширили круг числовых наукометрических показателей. В этом контексте написаны работы [4–7].

Цитируемая библиография свидетельствует, что наукометрия как таковая продолжает развиваться внутри «старых» парадигм, заложенных еще ее основоположниками В. В. Налимовым и З. М. Мульченко [8].

В целом большая часть российских наукометрических исследований отвечает в основном на количественные вопросы типа «чего и сколько?» и очень мало на качественные вопросы типа «хорошо или плохо?» или «какова динамика структурных связей в науке?», или «каковы тенденции и перспективы российской науки в целом или отдельных отраслей?» (по мнению авторов, «мало» отчасти в силу традиций, отчасти в силу сложности проблемы: ясно, что в четких категориях качественные показатели описать просто невозможно, а в нечетких нужна новая, «нечеткая логика» и, следовательно, «нечеткая математика»).

В работе [9] предложена идея именно качественного анализа статистической информации в приложении к анализу научного интереса к докладам на конференциях. Там предложена и реализована идея нечеткого ранжирования конференций в качественных категориях лингвистической переменной «индекс интереса конференции» в ее значениях «высокая», «хорошая», «удовлетворительная», «слабая».

Цель данной работы – применить идеи и аппарат работы [7, 9] для анализа уровня математических знаний студентов 1-го курса на основе данных ЕГЭ. В статье приведены данные апробации методики на примере. Проведена апробация методики на примере студентов 1-го курса РГРТУ им. В. Ф. Уткина (Рязань).

Предлагается в качестве полезного показателя качества студенческих групп и факультетов определить на основе данных статистики ЕГЭ индекс качества математических знаний студентов и провести его нечеткую кластеризацию.

Приведем необходимые определения, их интуитивные обоснования, свойства вводимых объектов, данные для алгоритмов, и дадим некоторые комментарии к ним.

### Индексы качества студенческих групп и вуза

**Определение 1.** Выберем студенческую группу под условным номером  $\Gamma$ -1 и составим список этой группы по алфавиту. Пусть число студентов в группе (или число записей фамилий в списке) есть  $N_1$ . Пусть  $i$ -й (по списку) студент получил балл на ЕГЭ равный  $q_{1i}$ , где 1 в нижнем индексе есть номер группы. Таким образом, массив  $q_{11}, \dots, q_{1N_1}$  содержит все баллы за ЕГЭ в группе  $\Gamma$ -1, каждый из которых есть натуральное число в пределах от 1 до 100.

Средний балл (индекс) знаний группы  $\Gamma$ -1 по данным ЕГЭ определим, как

$$P_1 = \left[ \left( \frac{1}{N_1} \right) \sum_{j=1}^{N_1} q_{1j} \right], \quad (1)$$

где квадратные скобки [...] обозначают стандартную функцию целой части числа. К примеру,  $[33,9] = 33$ . Здесь используется целая часть числа, а не само число для удобства применения и восприятия.

Число  $P_i$  вида (1) назовем (статистическим) индексом знаний группы Г-1.

Наряду со статистическим индексом  $P_i$  рассмотрим его среднеквадратичное отклонение (СКО) для группы Г-1

$$s_i = \sqrt{\left(\frac{1}{N_i - 1}\right) \left[ \sum_{j=1}^{N_i} (P_i - q_{1j})^2 \right]}. \quad (2)$$

Пусть подобные статистические данные собраны для всех студенческих групп общим числом  $K$ .

**Определение 2.** Мерой доверия к индексу  $P_i$  для группы Г- $i$  назовем число

$$\lambda_i = \log_2^{-1}(s_i + 2). \quad (3)$$

**ЗАМЕЧАНИЕ 1.** Мера доверия играет в оценке индекса группы некую «второстепенную» роль, что отражено в следующем определении.

**Определение 3.** Индексом знаний  $i$ -й группы по данным ЕГЭ назовем пару  $L_i = (P_i, \lambda_i)$ , при этом сравнение различных групп по их индексам проводится по правилу

$$L_i > L_j \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} \begin{cases} P_i > P_j, \\ (P_i = P_j) \text{ и } (\lambda_i < \lambda_j). \end{cases}$$

$$L_i = L_j \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} (P_i = P_j) \text{ и } (\lambda_i = \lambda_j). \quad (4)$$

**ЗАМЕЧАНИЕ 2.** Выбор определений (формул (3), (4)) неслучаен. Во-первых, ясно, что чем больше СКО  $s_i$ , тем больше разброс баллов в  $i$ -й группе и тем меньше доверия к локальному индексу  $P_i$ . Во-вторых, доверие не должно быстро уменьшаться при увеличении СКО, а лучше, вообще, предельно медленно; в-третьих, при  $s_i = 0$  значение  $\lambda_i$  должно равняться 1. Для всех этих условий функция (3) вида  $\log_2^{-1}(s_i + 2)$  показалась авторам оптимальной, в отличие от прямого использования СКО или дисперсии.

Как показывает опыт авторов, для целей оптимального управления учебным процессом зачастую недостаточно «простых» числовых статистических показателей. Нужны качественные оценки уровня знаний в группах (о чем авторы и писали во введении).

Такое ранжирование индексов знаний групп в качественных категориях «высокий», «хороший», «удовлетворительный», «слабый» проиллюстрировано на рис. 1.

Универсальное множество (универсум) значений индекса интереса  $P$  есть отрезок  $[0;100]$  оси абсцисс ( $Ox$ ), на котором заданы нечеткие подмножества (термы лингвистической переменной «Индекс интереса») своими функциями принадлежности. По оси ординат ( $Oy$ ) откладывается степень принадлежности  $\mu(P)$  переменной данному терму, которая классически принимает значения  $[0;1]$ .

Но в целях удобства восприятия и оценивания в данной работе степень принадлежности измеряется в процентах естественным образом. Термы лингвистической переменной описываются кусочно-линейными функциями принадлежности трапециевидной формы:

$$tr[a, m_1, m_2, b](x) = \begin{cases} \frac{x-a}{m_1-a}, & \text{если } a \leq x < m_1, \\ 1, & \text{если } m_1 \leq x \leq m_2, \\ \frac{b-x}{b-m_2}, & \text{если } m_2 < x \leq b, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $[a, b]$  – носитель терма,  $[m_1, m_2]$  – ядро терма. Промежутки  $[a, m_1]$  и  $[m_2, b]$  называют левым и правым спрядом терма соответственно.

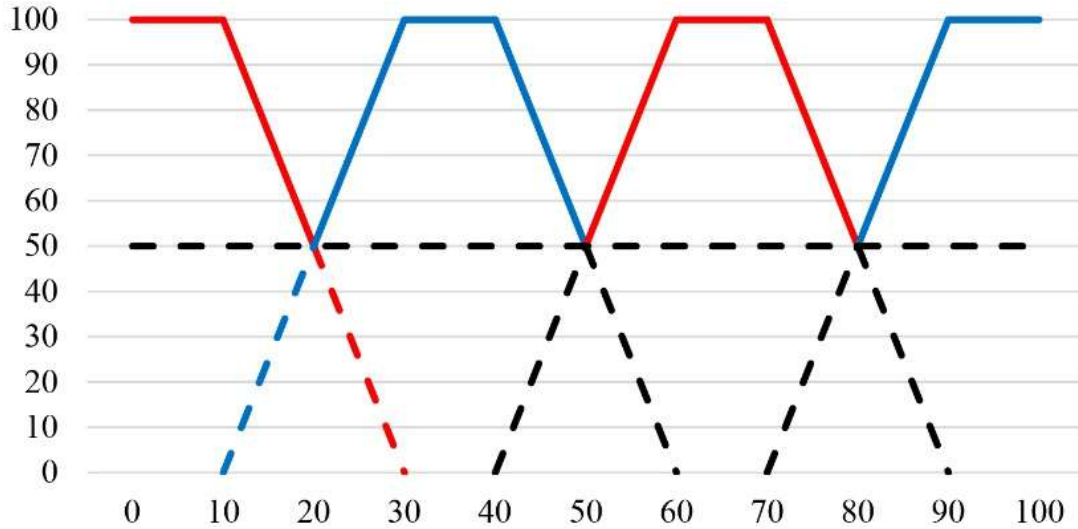


Рис. 1. Нечеткая кластеризация локальных индексов знаний:  
по горизонтальной оси абсцисс откладывается значение индекса знаний  $P$ ;  
по вертикальной оси ординат – мера принадлежности  $\mu(P)$  индекса знаний заданной категории

Так, терм «слабо» есть  $d_2(x) = tr[0; 0; 10; 30](x)$ , терм «удовлетворительно» есть  $d_3 = tr[10; 30; 40; 60](x)$ , терм «хорошо» есть  $d_4 = tr[40; 60; 70; 90](x)$ , терм «высоко» есть  $d_5 = tr[70; 90; 100; 100](x)$ .

Если элемент универсума, т.е. индекс знаний  $P$ , имеет ненулевые степени принадлежности двум соседним термам  $\mu_1(P)$ ,  $\mu_2(P)$ , степень принадлежности  $\mu(P)$  может определяться, например, по метрике Л. Заде  $\mu(P) = \max_p(\mu(P_1), \mu(P_2))$ .

Так, для индекса знаний  $P=15$  значение его степени принадлежности терму  $d_2$  «слабо»  $\mu_2(15) = 75\%$ , а терму  $d_3$  «удовлетворительно»  $\mu_3(15) = 25\%$ , следовательно,  $\mu(15) = \max_L(75\%, 25\%) = 75\%$ . При этом если  $\mu_j(P) = \mu_{j+1}(P)$ , то по **определению** выбирается терм  $j+1$ .

### ЗАМЕЧАНИЕ 3.

1. Укажем на обоснованность применения теории нечетких множеств в данной идее, которая позволяет избежать резких скачков в оценке уровня знаний. В самом деле, общеизвестно, что именно идея «нечеткости», в данном случае нечетких множеств, позволяет сохранить устойчивость оценок, избежать резких скачков в оценках, когда небольшие изменения данных (или даже мелкие ошибки в подсчетах) могут существенно сказаться на итоговой оценке, переводя оценку знаний из более высокого класса в более низкий, что, естественно, неприятно и для членов группы, и для руководства вузов.

2. Функция принадлежности имеет в данном случае (рис. 1) линейный характер, что, вообще говоря, не обязательно. Характер функции определяется исследователем и на основе его опыта.

3. Это же относится и к параметрам термов и их количеству.

4. Это же относится и к метрике. Метрика А. Заде выбрана автором, исходя из условий «простоты» эксперимента. При оценивании сложных процессов могут быть использованы и другие метрики: Лукасевича, Гамахера, Эйнштейна.

5. Строго говоря, термин «метрика» лучше бы заменить на более точный термин «Т-конорма». Но в данном конкретном случае, имея в виду, что статья направлена на практическое использование ее результатов, термин «метрика» лучше приживется, по мнению авторов, у пользователей.

### Характер распределения математических знаний среди студентов 1 курса по вузу

Соберем значения индексов студенческих групп вуза в (упорядоченном) массиве  $D = (L_{i_1}, \dots, L_{i_N})$  таким образом, чтобы они шли в порядке убывания (невозрастания, слева направо) ввиду формулы (4). Равные индексы  $L_{i_j}$  располагаются произвольно (на своем участке), это не влияет на приводимые ниже наукометрические показатели.

Первые компоненты членов массива  $D$  соберем в массиве  $P = (P_{i_1}, \dots, P_{i_N})$ . Ясно, что порядок убывания сохранится в массиве  $P$ .

Аппроксимируем массив данных  $P$  по методу наименьших квадратов (МНК) сначала линейной зависимостью  $y_1 = ax + b$ , а затем обратной пропорцией  $y_2 = \frac{a}{x} + b$ . Выбор МНК в качестве метода сглаживания традиционен для подобных статистических экспериментов, ибо ошибки «измерений» с большой вероятностью подчинены нормальному закону распределения.

Вычислим в каждом случае меры невязок  $\delta_1$  и  $\delta_2$  этих приближений соответственно.

**Определение 4.** Если невязки связаны неравенством  $\delta_1 \leq \delta_2$ , тогда студенческие группы имеют равномерное распределение знаний в вузе, в противном случае – неравномерное.

**ЗАМЕЧАНИЕ 4.** Введенный характер распределения знаний в вузе, равномерный или неравномерный, отражает, как правило, характер распределения научной эрудиции студентов (в ее интуитивном понимании) в вопросах, вынесенных на ЕГЭ, и может служить оценкой качества ЕГЭ.

### «Ядро», «хвост» и «подвал» индекса знаний по вузу

**Определение 5.** Пусть в вузе набрано  $N$  групп на первый курс. Вычислим среднее значение (статистическое математическое ожидание) частных индексов знаний групп по факультету

$$J = \left[ \left( \frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N P_i \right],$$

где квадратные скобки [...] обозначают стандартную функцию целой части числа,

и назовем его средним индексом знаний факультета.

Разбросом знаний по вузу назовем статическое среднеквадратичное отклонение

$$\Delta = \sqrt{\left( \frac{1}{N-1} \right) \sum_{i=1}^N (P_i - J)^2}.$$

По паре значений  $(J, \Delta)$  можно сравнивать характеристики разных вузов по аналогии с определением 3, формула (4).

Но по убежденному мнению авторов, в целях «более тонкой оценки» базы знаний студентов, более эффективного управления учебным процессом интересен не этот «статистический» критерий на основе пары  $(J, \Delta)$ , а более «сильный», наукометрический показатель уровня знаний по вузу, аналогичный индексу цитирования Хирша [10].

Опишем этот показатель. По списку  $P$  построим список (массив)  $P^* = \{P_{i_1} - J, \dots, P_{i_s} - J\}$ , составленный из тех индексов групп, для которых индекс знаний превосходит средний индекс:  $P_{i_j} \geq J$ , и пусть этот массив содержит  $s$  записей.

**Определение 6.** Индексом знаний (или псевдоиндексом Хирша) студентов 1-го курса вуза (своеобразным индексом Хирша студентов 1-го курса вуза) назовем число

$$h = \min\{s, J\}. \quad (5)$$

В целях удобства употребления индекс  $h$  будем называть также псевдоиндексом Хирша студентов вуза.

**ЗАМЕЧАНИЕ 5.** Содержательно индекс  $h$ , по аналогии с индексом Хирша, описывает некий максимальный по «площади» «квадрат знаний» – подмножество ядра знаний, когда среди студентов 1-го курса гарантированно присутствует  $h$  студентов с  $h$  (точнее, не менее) баллами, и увеличить сторону этого квадрата в рамках определений нельзя.

Аргументация в пользу именно квадрата *a'la Hirsch* представлена в основополагающих (для данной темы) работах [7, 9] и потому здесь (в целях экономии времени и пространства) опущена.

Пусть последний (считая слева) элемент  $d = P_i - J$  входит в массив  $P^*$   $r+1$  раз (где  $r=0$ , если  $d$  входит лишь один раз).

Из отброшенных элементов  $P_i - J$ , которых будет  $r$  штук, если они есть, сформируем массив  $T^*$ .

**Определение 7.** Хвостом индекса знаний назовем массив  $P^* = \{x_{i_1}, \dots, x_{i_s}\}$ . Подвалом индекса знаний назовем массив  $T^*$ . Ядром знаний вуза назовем «прямоугольник» со сторонами  $s \times J$ .

Нетрудно видеть, что квадрат знаний является подмножеством ядра знаний.

**ЗАМЕЧАНИЕ 6.** В работах [7, 9] показано также, что отброшенные при формировании «псевдоиндекса Хирша» «хвост» и «подвал» знаний, содержат полезную информацию, позволяющую уточнить данные о качестве знаний студентов 1-го курса по данным ЕГЭ.

Аргументация в пользу такого учета в этой работе также не приводится по тем же причинам, что и в замечании 5.

### Главный индекс знаний по вузу

Нетрудно видеть, что значения  $s$  – число элементов в массиве  $P^*$ , число  $d = P_i - J$  – последний элемент в массиве  $P^*$ , связаны неравенствами:  $d \geq J$ .

**Определение 8.** Главным  $M$ -индексом знаний студентов 1-го курса вуза назовем натуральное число

$$M = \min\{S, d\}, \quad (5)$$

где  $S = s + r$ , а квадратные скобки [...] по-прежнему обозначают стандартную функцию целой части числа.

Очевидно,  $M \geq h$ .

### Нечеткое ранжирование по главному индексу

По значению индекса  $M$  проводится нечеткое ранжирование оценок вуза в четырех качественных категориях: «высокая», «хорошая», «удовлетворительная», «слабая». Ранжирование проводится аналогично ранжированию индивидуальных индексов, графически изображено на рис. 2, и параметры его легко восстанавливаются по аналогии с рис. 1.

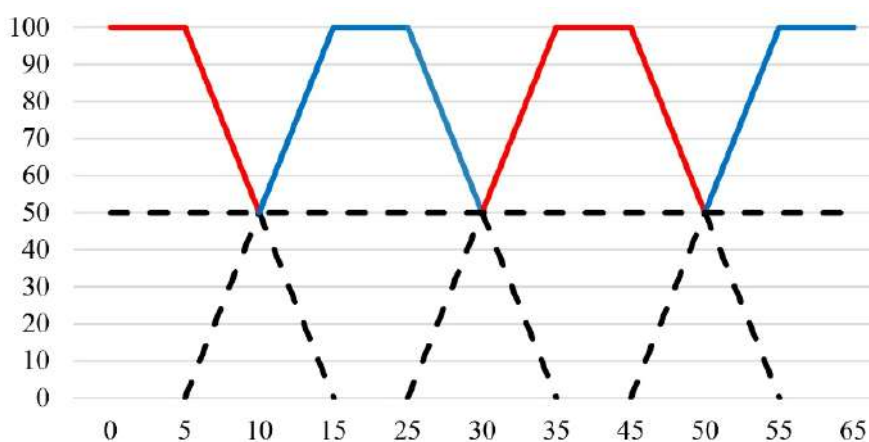


Рис. 2. Нечеткая кластеризация главного  $M$ -индекса знаний

### Программный комплекс «ЗНАНИЕ – СИЛА»

Программный комплекс «ЗНАНИЕ – СИЛА» предназначен для сбора и обработки данных ЕГЭ для вычисления уровня знаний студентов групп и вуза в целом.

Комплекс использует Google Формы для сбора данных, коды для предоставления доступа к данным ЕГЭ, Google Таблицы для хранения и обработки информации.

Процесс работы комплекса выглядит следующим образом:

1. Создание формы-1 (таблицы) опроса с помощью Google Форм. В форме-1 указываются фамилия, инициалы (ФИО) всех студентов.
2. На основе формы-1 генерируется форма-2. В форме-2 участники будут выставять «оценки ЕГЭ» в диапазоне от 1 до 20. Этот диапазон затем автоматически переводится в диапазон от 1 до 100 (процентов).
3. Оценка может выставляться по списку вручную и затем вноситься в форму, либо выставляется через сотовый телефон по QR-коду в разделе «балл ЕГЭ».
4. Осуществляется генерация QR-кода для доступа к форме-2 опроса. Сам QR-код генерируется с помощью сервисов по выбранной ссылке среди предназначенных для этого программ, которые специализируются на генерации QR-кодов по ссылкам. Построенные таким образом коды (в том количестве, которое необходимо и достаточно для проведения тестирования) можно распечатать и разместить (или предварительно распространить) на месте проведения мероприятия среди его участников.
5. Участники мероприятия сканируют QR-код своим смартфоном и ставят свои баллы ЕГЭ. Данные, собранные с помощью Google Формы, которые могут загружаться, как в процессе доклада, так и по окончании его и даже после всех докладов, после команды конкретного участника мероприятия со своего смартфона в автоматическом режиме отправляются в Google Таблицы, после отправления данные уже изменить нельзя.
6. Производится вычисление индексов знаний групп, среднеквадратичного отклонения средней оценки по каждой из групп, представленных на мероприятии за счет формул СУММ, СЧЕТ, ПУСТО, ОКРУГ и других, «защитых» в комплексе «ЗНАНИЕ – СИЛА» на основе соответствующих формул. Для этого используются идентичные математические формулы, встроенные в Google Таблицы.
7. Визуализация полученных данных в виде таблиц и графиков производится с помощью встроенных графических элементов в Google Таблицах. Это позволяет наглядно представить результаты опроса и выявить наиболее интересные для участников моменты.
8. Система автоматически (в реальном времени) выбирает «победителей» мероприятия – студентов с высшими баллами (номинация «баллы знаний»).
9. Формируется таблица данных по ЕГЭ с «лучшими» баллами, т.е. с баллами ЕГЭ, выше среднего предельного порога.
10. На основе данных о таких баллах по всем студентам вуза формируется таблица голосов участников мероприятия.
11. По данным таблицы знаний вычисляются  $h$ -индекс и  $M$ -индекс знаний вуза и кластеризация знаний по вузу.

### Апробация

В опросе, связанном с результатами ЕГЭ, приняли участие студенты факультета: вычислительной техники; автоматики и информационных технологий в управлении; электроники; радиотехники и телекоммуникаций; инженерно-экономического. Всего в опросе участвовало 47 групп:

- 8 – инженерно-экономического факультета;
- 8 – автоматики и информационных технологий в управлении;
- 12 – вычислительной техники;
- 10 – электроники.

Максимально возможный балл за ЕГЭ по профильной математике составлял 100 баллов. Проведя анализ предоставленных данных, получили результаты. Рассмотрим их на примере студентов вуза за 2024 г.

Средний балл по вузу за ЕГЭ по профильной математике составляет 66 баллов.

$M = 28$  – главный индекс знаний студентов первого курса вуза.

$h = 28$  – индекс знаний студентов первого курса вуза.

Полученные значения индексов соответствуют удовлетворительному уровню подготовки студентов 1 курса (рис. 3).

Результаты показывают, что лучшие показатели входного контроля были зафиксированы в 2020 и 2022 гг. (6 баллов), тогда как наихудший результат отмечен в 2023 г. (4 балла). В 2024 г. наблюдается незначительный рост, но уровень остается ниже значений 2020 и 2022 гг.

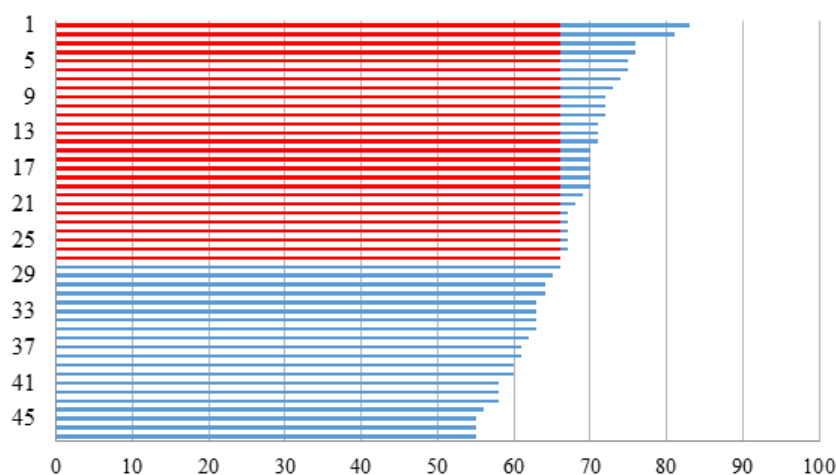


Рис. 3. Результаты по вузу

### Заключение

Настоящая работа – попытка отойти от принятых шаблонов и схем в оценке уровня математических знаний студентов первокурсников отдельных групп и вуза в целом.

В статье предложен легко вычисляемый индекс знаний  $M$  для вуза, который дает зримую оценку знаний первокурсников на основе эксклюзивного опроса участников мероприятия. Этот индекс может стать полезным критерием, с помощью которого можно беспристрастно сравнивать уровни знаний разных вузов.

Нечеткое ранжирование уровней знаний позволяет руководству вузов и спонсорам планировать свою деятельность на будущее с целью увеличения рейтинга вуза. Данная статья дает беспрецедентную возможность распространения новой наукометрической методики.

Введенные индексы интереса не имеют накопительного характера в отличие от индекса Хирша или его обобщений, они носят, неустойчивый единовременный характер. Но интересные закономерности могут просматриваться на определенных периодах исследования динамики индексов знаний.

### Список литературы

1. Гуськов А. Е. Российская наукометрия: обзор исследований // Библиосфера. 2015. № 3. С. 75–86.
2. Гришина Е. А. Проблемы применения наукометрических методов к измерению эффективности публикационной активности вузовских преподавателей // Вестник РГГУ. Сер.: Философия. Социология. Искусствоведение. 2019. № 2. С. 103–114.
3. Гринев А. В. Наукометрический портрет ученого как инструмент оценки его достижений // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92, № 4. С. 339–349.
4. Холодов А. С. Об индексах цитирования научных работ // Вестник Российской академии наук. 2015. Т. 85, № 4. С. 310–320.
5. Мазов Н. А., Гуреев В. Н. Альтернативные подходы к оценке научных результатов // Вестник Российской академии наук. 2015. Т. 85, № 2. С. 115–122.
6. An index to quantify an individual's scientific leadership. 2020. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11192-018-2994> (дата обращения: 11.04.2024).
7. Миронов В. В. Новые индексы публикационной активности автора // Вестник Российской академии наук. 2020. № 1. С. 959–966.
8. Налимов В. В., Мульченко З. М. Наукометрия. Изучение науки как информационного процесса. М. : Наука, 1969. 192 с.
9. Миронов В. В. Индекс интереса участников к научной конференции и его кластеризация на основе нечетких множеств // Управление наукой и наукометрия. 2024. Т. 19, № 3. С. 592–611.
10. Hirsch J. E. An Index to Quantify an Individual's Scientific Research Output // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2005. Vol. 102, № 46. P. 16569–16572. doi: 10.1073/pnas.0507655102
11. Старостин И. Е. Метод математического прототипирования энергетических процессов как инструмент синтеза математического ядра цифровых двойников различных физико-химических систем // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 41–50.
12. Годунов А. И., Куканов С. А., Суздальцев П. С., Мухамбетов А. М. Математическая модель системы управления квадрокоптером // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 25–31.

## References

1. Gus'kov A.E. Russian scientometry: a review of research. *Bibliosfera = Biblosphere*. 2015;(3):75–86. (In Russ.)
2. Grishina E. A. Problems of applying scientometric methods to measuring the effectiveness of university teachers' publication activity. *Vestnik RGGU. Ser.: Filosofiya. Sotsiologiya. Iskusstvovedenie = Bulletin of the Russian State University. Ser.: Philosophy. Sociology. Art history*. 2019;(2):103–114. (In Russ.)
3. Grinev A.V. Scientometric portrait of a scientist as a tool for assessing his achievements. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2022;92(4):339–349. (In Russ.)
4. Kholodov A.S. On the citation indexes of scientific papers. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2015;85(4):310–320. (In Russ.)
5. Mazov N.A., Gureev V.N. Alternative approaches to the evaluation of scientific results. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2015;85(2):115–122. (In Russ.)
6. *An index to quantify an individual's scientific leadership*. 2020. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11192-018-2994> (accessed 11.04.2024).
7. Mironov V.V. New indexes of the author's publication activity. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2020;(1):959–966. (In Russ.)
8. Nalimov V.V., Mul'chenko Z.M. *Naukometriya. Izuchenie nauki kak informatsionnogo protsessa = Scientometry. The study of science as an information process*. Moscow: Nauka, 1969:192. (In Russ.)
9. Mironov V.V. Index of participants' interest in a scientific conference and its clusterization based on fuzzy sets. *Upravlenie nauкой i naukometriya = Management of science and scientometry*. 2024;19(3):592–611. (In Russ.)
10. Hirsch J.E. An Index to Quantify an Individual's Scientific Research Output. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2005;102(46):16569–16572. doi: 10.1073/pnas.0507655102
11. Starostin I.E. Method of mathematical prototyping of energy processes as a tool for synthesizing the mathematical core of digital twins of various physico-chemical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(3):41–50. (In Russ.)
12. Godunov A.I., Kukanov S.A., Suzdal'tsev P.S., Mukhambetov A.M. Mathematical model of a quadcopter control system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):25–31. (In Russ.)

## Информация об авторах / Information about the authors

### Кирилл Валентинович Бухенский

кандидат физико-математических наук, доцент,  
заведующий кафедрой высшей математики,  
Рязанский государственный радиотехнический  
университет имени В. Ф. Уткина  
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)  
E-mail: bukhensky.k.v@rsreu.ru

### Kirill V. Bukhenskiy

Candidate of physical and mathematical sciences,  
associate professor, head of the sub-department  
of higher mathematics,  
Ryazan State Radio Engineering University  
named after V.F. Utkin  
(59/1 Gagarina street, Ryazan, Russia)

### Татьяна Львовна Львова

старший преподаватель кафедры высшей математики,  
Рязанский государственный радиотехнический  
университет имени В. Ф. Уткина  
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)  
E-mail: lvovatl@yandex.ru

### Tatyana L. Lvova

Senior lecturer of the sub-department  
of higher mathematics,  
Ryazan State Radio Engineering University  
named after V.F. Utkin  
(59/1 Gagarina street, Ryazan, Russia)

### Валентин Васильевич Миронов

доктор физико-математических наук, профессор,  
президент Рязанского физико-математического  
общества,  
профессор кафедры высшей математики,  
директор лаборатории системного анализа,  
ведущий научный сотрудник,  
Научно-исследовательский институт обработки  
аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон»),  
Рязанский государственный радиотехнический  
университет имени В. Ф. Уткина  
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)  
E-mail: mironovlv@mail.ru

### Valentin V. Mironov

Doctor of physical and mathematical sciences, professor,  
president of the Ryazan Physico-Mathematical Society,  
professor of the sub-department  
of higher mathematics,  
director of the system analysis laboratory,  
leading researcher,  
Research Institute for Space Image Processing  
(SRI "Photon"),  
Ryazan State Radio Engineering University  
named after V.F. Utkin  
(59/1 Gagarina street, Ryazan, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 08.09.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 26.09.2024**

**Принята к публикации/Accepted 07.10.2024**

## АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ВЫБОРЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ КОНТРОЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Д. Н. Новомейский<sup>1</sup>, М. Н. Пиганов<sup>2</sup>, Е. Т. Ескибаев<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Россия

<sup>3</sup> Военный институт сил воздушной обороны, Актобе, Казахстан

<sup>1,2</sup> kipres@ssau.ru, <sup>3</sup> erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальность темы данной работы обусловлена необходимостью повышения эффективности, достоверности и качества результатов измерительного контроля при электрофизической обработке пленочных резисторов микросборок высокочастотным факельным разрядом. Цель – анализ и оценка методических погрешностей процесса электрофизической обработки пленочных резисторов высокочастотным факельным разрядом, реализуемого по заданному алгоритму. *Материалы и методы.* Использованы компьютерное моделирование, программирование, натурный эксперимент, экспертные оценки. Проведен системный анализ погрешностей при электрофизической обработке пленочных резисторов высокочастотным факельным разрядом. Он показал, что основной вклад в точностные характеристики технологического устройства обработки вносят элементы методической, инструментальной и дополнительной погрешностей. Выявлены основные составляющие методической погрешности. Показано, что среди элементов общей методической погрешности определяющее значение имеет погрешность величины зазора между пленочным резистором и рабочим электродом технологического устройства обработки. При определении величины зазора между электродом и пленкой использовали формулу, входящую в состав модели обработки факельным разрядом. Для расчетов использовался математический пакет MathCAD. Детальный анализ процесса образования методической погрешности определения зазора между электродом и пленкой при работе технологического устройства показал, что основными факторами ее формирования являются мощность и температура факела, воздействующего на поверхность образца. Выполнена оценка методической погрешности величины зазора «резистор-электрод». *Результаты.* Получены математические выражения для определения методической погрешности. Общая методическая погрешность определения величины зазора для наихудшего случая равна 20 %. При оценке погрешности определения температуры факела использовали метод «прямоугольников». Он показал, что методическая погрешность определения температуры разряда составляет 2,6 %. *Выводы.* Приведенные результаты могут быть использованы при выборе измерительной части устройства контроля процесса обработки факельным разрядом, в процессе оптимизации измерительных процедур, а также в качестве исходных данных при разработке ИИС для технологического сопровождения процесса обработки пленочных структур.

**Ключевые слова:** факельный разряд, точность обработки, погрешности, методическая погрешность, зазор, мощность, температура, резистор, электрод, формулы для оценки, выбор, измерительная часть

**Для цитирования:** Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Ескибаев Е. Т. Анализ методической погрешности электрофизической обработки пленочных резисторов при выборе измерительной части контрольного устройства // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 68–74. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-7

## ANALYSIS OF THE METHODOLOGICAL ERROR OF ELECTROPHYSICAL PROCESSING OF FILM RESISTORS WHEN CHOOSING THE MEASURING PART OF THE CONTROL DEVICE

D.N. Novomeisky<sup>1</sup>, M.N. Piganov<sup>2</sup>, E.T. Eskibaev<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

<sup>3</sup> Military Institute of Air Defense Forces, Aktobe, Kazakhstan

<sup>1,2</sup> kipres@ssau.ru, <sup>3</sup> erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The relevance of the topic of this work is due to the need to improve the efficiency, reliability and quality of measurement control results during electrophysical processing of film resistors of microassemblies by high-frequency flare discharge. Purpose – Analysis and evaluation of methodological errors in the process of

electrophysical processing of film resistors by high-frequency flare discharge, implemented according to a given algorithm. *Materials and methods.* Computer modeling, programming, full-scale experiment, expert assessments were used. A systematic analysis of errors in the electrophysical processing of film resistors by high-frequency flare discharge is carried out. He showed that the main contribution to the accuracy characteristics of the technological processing device is made by the elements of methodological, instrumental and additional errors. The main components of the methodological error are revealed. It is shown that among the elements of the general methodological error, the error of the gap between the film resistor and the working electrode of the processing device is of decisive importance. When determining the size of the gap between the electrode and the film, the formula included in the flare discharge treatment model was used. The MathCAD mathematical package was used for calculations. A detailed analysis of the process of formation of the methodological error in determining the gap between the electrode and the film during the operation of the technological device showed that the main factors of its formation are the power and temperature of the torch acting on the surface of the sample. The estimation of the methodological error of the gap "resistor-electrode" is carried out. *Results.* Mathematical expressions for determining the methodological error are obtained. The general methodological error in determining the gap size for the worst case is 20 %. When estimating the error in determining the temperature of the torch, the method of "rectangles" was used. He showed that the methodological error in determining the discharge temperature is 2,6 %. *Conclusions.* These results can be used when selecting the measuring part of the flare discharge processing control device, in the process of optimizing measurement procedures, as well as as input data for the development of an AIS for technological support of the processing of film structures.

**Keywords:** flare discharge, processing accuracy, errors, methodological error, gap, power, temperature, resistor, electrode, formulas for evaluation, selection, measuring part

**For citation:** Novomeisky D.N., Piganov M.N., Eskibaev E.T. Analysis of the methodological error of electrophysical processing of film resistors when choosing the measuring part of the control device. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(4):68–74. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-7

## Введение

В настоящее время в эксплуатации находится большое количество автономных измерительных приборов, соединенных с ЭВМ через стандартный интерфейс. Основным недостатком СИ этой группы является значительная избыточность, вызванная тем, что каждый из входящих в систему автономных приборов имеет свои органы управления и индикации, сравнительно мощный источник питания, а также встроенную ЭВМ.

Они достаточно дороги в эксплуатации, поэтому стремятся упростить измерительные блоки и реализовать магистрально-модульный принцип. В этом случае используется один или несколько измерительных модулей, которые соединены с управляющей ЭВМ через единую магистраль. Для сбора и обработки измерительной информации на данном этапе требуется разработка новой архитектуры средств измерения.

Одним из направлений повышения точности измерительных систем является оптимизация измерительных процедур [1] путем использования новых методов и алгоритмов. Для этого требуется провести анализ и оценку всех составляющих погрешностей измерения соответствующих параметров. В первую очередь необходимо получить аналитические выражения для методических погрешностей. Примером такого подхода является работа [2], в которой дана оценка методической погрешности измерения показателей степени частотной зависимости спектра низкочастотного шума. Затем требуется оценить и дать рекомендации по минимизации суммарной методической погрешности. Следующим этапом может быть разработка адаптивных алгоритмов измерения исследуемых параметров. После этого можно переходить к разработке измерительной оснастки и дополнительных устройств [3].

## Постановка задач

Целью данной работы является оценка и анализ методических погрешностей процесса электрофизической обработки пленочных резисторов микросборок высокочастотным факельным разрядом. Технологические основы обработки пленочных структур факельным разрядом (ФР) освещены в работах [4, 5]. Обработка производится в соответствии с алгоритмом [6].

## Оценка и анализ методической погрешности

Элементы общей методической погрешности определения величины зазора между пленкой и электродом технологического устройства обработки факельным разрядом  $\gamma_{\text{мз}}(P_{\text{ф}}, T_{\text{ф}})$  зависят от мощности и температуры факельного разряда, действующего на поверхность образца.

При определении величины зазора между электродом и пленкой была использована формула (1), которая является моделью подгонки факельным разрядом, при толщине подложки  $b$ , равной 1 мм. Для расчетов использовался математический пакет MathCAD [6]:

$$l = -\frac{\sqrt{5}\omega_{Le}R_2}{2\sqrt{\omega v}} \ln \frac{G_1S + G_2 + \frac{8\pi \cdot 10^{-3}bt_p C_\phi^3}{\omega a^3 (G_1S + G_2) e^{\left(\frac{a}{2}T_u G_3 + \frac{3}{2}k_\phi T_\phi\right)}}}{P_\phi} - d. \quad (1)$$

Температура факельного разряда в процессе подгонки изменялась в пределах от 3500 до 4000 К с шагом 50 К, а мощность факельного разряда, формируемого с помощью генератора факельного разряда, изменялась переключателем мощности в пределах от 35 до 100 Вт с шагом 2,5 Вт. Из проведенного эксперимента по подгонке сопротивления пленочных резисторов было установлено, что оптимальный зазор между электродом и образцом 1 составляет 1,5 мм, или 0,0015 м. Таким образом, для нахождения методической погрешности определим зазор между электродом и образцом при минимальном ( $P_\phi = 35$  Вт,  $T_\phi = 3500$  К) и максимальном ( $P_\phi = 100$  Вт,  $T_\phi = 4000$  К) режимах работы генератора факельного разряда.

При  $P_\phi = 35$  Вт,  $T_\phi = 3500$  К имеем  $l = 0,0018$  м, а при  $P_\phi = 100$  Вт,  $T_\phi = 4000$  К получим  $l = 0,00129$  м.

Тогда

$$\gamma_{M3 \max}(P_\phi, T_\phi) = \frac{0,0018 - 0,0015}{0,0015} \cdot 100\% = 20\%; \quad \gamma_{M3 \min}(P_\phi, T_\phi) = \frac{0,00129 - 0,0015}{0,0015} \cdot 100\% = -14\%.$$

В итоге общая методическая погрешность определения величины зазора между электродом и пленкой для наихудшего случая будет равна  $\gamma_{M3}(P_\phi, T_\phi) = 20\%$ .

Для оценки методической погрешности определения температуры факельного разряда выберем известное решение уравнения теплопроводности, наиболее близкое для рассматриваемого случая [7]:

$$T(x, t) = \int_0^t q_1(\epsilon) \frac{\partial \Theta(x, t - \epsilon)}{\partial t} d\epsilon + \int_0^t q_2(\epsilon) \frac{\partial \Theta(b - x, t - \epsilon)}{\partial t} d\epsilon + T_0, \quad (2)$$

где  $q_1(\epsilon)$  – удельный тепловой поток на рабочую поверхность, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_2(\epsilon)$  – удельный тепловой поток, отводимый с нижнего основания образца, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_0$  – начальная температура, К.

Температурная реакция тела на единичный тепловой поток  $\Theta(x, t)$  на одной из границ определяется по формуле

$$\Theta(x, t) = \frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{at}{b} + \frac{3(b-x)^2 - b^2}{6b} + \frac{2b}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{k^2} \exp\left(-k^2 \pi^2 \frac{at}{b^2}\right) \cos\left(k\pi \frac{b-x}{b}\right) \right\}, \quad (3)$$

где  $b$  – толщина образца, м;  $a = \lambda/C$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $C$  – объемная теплоемкость материала, Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Все необходимые преобразования выражений выполнены в статье [8], поэтому приведем здесь конечную формулу для определения температуры поверхности образца:

$$T_{surf}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} T_{surf}(x) \exp(xt) dx \approx \int_{-x}^{+x} T_{surf}(x) \exp(xt) dx, \quad (4)$$

где  $x$  – максимальное машинное число;  $t$  – время, с.

Используя формулу (4), можно решить задачу не на всем бесконечном диапазоне значений аргумента  $x$ , а только на определенном интервале. Поэтому для решения будем использовать метод прямоугольников [9].

Для начала представим интеграл через сумму на небольших интервалах:

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=1}^N \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx,$$

где  $f(x) = T_{surf}(x) \exp(xt)$ .

С учетом того, что  $x_{i-\frac{1}{2}} = x_i - 0,5h$ , где  $h$  – шаг, метод прямоугольников получается при использовании следующей замены:

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x)dx \approx f(x_{i-\frac{1}{2}})h.$$

Для нахождения погрешности данного метода воспользуемся следующим выражением [9]:

$$\varphi_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x)dx - f(x_{i-\frac{1}{2}})h.$$

Запишем данное выражение в виде, удобном для дальнейшей работы:

$$\varphi_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x)dx - f(x_{i-\frac{1}{2}}))dx. \quad (5)$$

Разложим первое слагаемое в интеграле (5) с помощью формулы Тейлора вблизи точки  $x = x_{i-\frac{1}{2}}$ .

При этом получаем

$$f(x) = f(x_{i-\frac{1}{2}}) + (x - x_{i-\frac{1}{2}})f'(x_{i-\frac{1}{2}}) + \frac{(x - x_{i-\frac{1}{2}})^2}{2}f''(\xi_i), \quad (6)$$

где  $\xi_i \in [x_{i-1}, x_i]$ . Подставляя формулу (6) в (5), получаем

$$\varphi_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left[ (x - x_{i-\frac{1}{2}})f'(x_{i-\frac{1}{2}}) + \frac{(x - x_{i-\frac{1}{2}})^2}{2}f''(\xi_i) \right] dx. \quad (7)$$

Первое слагаемое в интеграле (7) равно нулю.

Таким образом, исходя из полученного результата погрешность при использовании метода прямоугольника с половинным дроблением будет выглядеть следующим образом:

$$\varphi_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{(x - x_{i-\frac{1}{2}})^2}{2} f''(\xi_i) dx. \quad (8)$$

Далее возьмем интеграл с учетом неравенства  $f''(\xi_i) \leq \max_{x \in [x_{i-1}, x_i]} |f''(x)|$ :

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{(x - x_{i-\frac{1}{2}})^2}{2} f''(\xi_i) dx = \frac{f''(\xi_i)}{2} \int_{x_{i-1}}^{x_i} (x - x_{i-\frac{1}{2}})^2 dx = \frac{f''(\xi_i)}{6} \left[ \left( x - x_{i-\frac{1}{2}} \right)^3 \right]_{x_{i-1}}^{x_i} = \\ &= \frac{f''(\xi_i)}{6} \left[ \left( x_i - x_{i-\frac{1}{2}} \right)^3 - \left( x_{i-1} - x_{i-\frac{1}{2}} \right)^3 \right] = \frac{f''(\xi_i)}{6} [(0,5h)^3 - (-0,5h)^3] = \\ &= \frac{f''(\xi_i)}{6} \cdot 0,25h^3 = \frac{f''(\xi_i)h^3}{24} \leq \frac{h^3}{24} \max_{x \in [x_{i-1}, x_i]} |f''(x)|. \end{aligned}$$

Таким образом, получаем погрешность результата при использовании метода прямоугольника с половинным дроблением в следующем виде [9]:

$$|\varphi_i| \leq \frac{h^3}{24} \max_{x \in [x_{i-1}, x_i]} |f''(x)|. \quad (9)$$

Формула (9) имеет погрешность  $O(h^3)$  при  $h \rightarrow 0$ .

Проверим, какая погрешность будет при использовании метода прямоугольника для данной работы. Определим параметры в формуле (9), которые необходимы для нахождения погрешности:

1. Определение шага ( $h$ ).

Чтобы найти шаг, необходимо определить правую и левую границы изменения аргумента  $x$  и количество точек разбиения. Будем рассматривать интегрирование при изменении значения  $x$  от  $-1000$  до  $1000$ . Количество точек зададим величиной  $10\,000$ . Тогда шаг будет определяться следующим образом:

$$h = \frac{1000 - (-1000)}{10000} = 2 \cdot 10^{-1}.$$

2. Определение  $\max_{x \in [x_{i-1}, x_i]} |f''(x)|$ .

В качестве рассматриваемой функции возьмем все, что находится под интегралом в выражении (4):

$$f(x) = T_{surf}(x) \exp(xt).$$

Найдем первую производную от функции  $f(x)$ :

$$f'(x) = T'_{surf}(x) \exp(xt) + T_{surf}(x) t \exp(xt).$$

Аналогичным образом рассчитывается вторая производная от функции  $f(x)$ :

$$\begin{aligned} f''(x) &= T''_{surf}(x) \exp(xt) + T'_{surf}(x) t \exp(xt) + T'_{surf}(x) t \exp(xt) + T_{surf}(x) t^2 \exp(xt) + \\ &+ T_{surf}(x) t^2 \exp(xt) = T''_{surf}(x) \exp(xt) + 2T'_{surf}(x) t \exp(xt) + T_{surf}(x) t^2 \exp(xt). \end{aligned}$$

Далее необходимо вычислить модуль от  $f''(x)$  в программной среде MathCAD и сделать цикл по всем отрезкам, которые составляют наш интервал с целью выявления максимума функции  $f''(x)$ .

После программирования данного аналитического выражения и его решения получаем  $\max |f''(x)| = 2,7336 \cdot 10^5$ . Таким образом, абсолютная погрешность используемого метода составляет

$$|\varphi_i| \leq \frac{(0,2)^3}{24} \cdot 2,7336 \cdot 10^5 \leq 91 \text{ К}.$$

Начальная температура факельного разряда при обработке образца составляет  $T_{\phi 0} = 3500 \text{ К}$ , следовательно, методическая погрешность определения температуры факельного разряда равна

$$\gamma_{\text{м.т.}} = \frac{3591 - 3500}{3500} \cdot 100 \% = 2,6 \%.$$

### Заключение

Проведен системный анализ погрешностей при электрофизической обработке пленочных резисторов высокочастотным факельным разрядом. Он показал, что основной вклад в точностные характеристики технологического устройства обработки вносят элементы методической, инструментальной и дополнительной погрешностей. Выявлены основные составляющие методической погрешности. Показано, что среди элементов общей методической погрешности определяющее значение имеет погрешность величины зазора между пленочным резистором и рабочим электродом технологического устройства обработки. При определении величины зазора между электродом и пленкой использовали формулу, входящую в состав модели обработки факельным разрядом. Для расчетов использовался математический пакет MathCAD. Детальный анализ процесса образования методической погрешности определения зазора между электродом и пленкой при работе технологического устройства показал, что основными факторами ее формирования являются мощность и температура факела, воздействующего на поверхность образца. Выполнена оценка методической погрешности величины зазора «резистор – электрод».

Получены математические выражения для определения методической погрешности. Общая методическая погрешность определения величины зазора для наихудшего случая равна 20 %. При оценке погрешности определения температуры факела использовали метод «прямоугольников». Он показал, что методическая погрешность определения температуры разряда составляет 2,6 %.

Приведенные результаты могут быть использованы при выборе измерительной части устройства контроля процесса обработки факельным разрядом, в процессе оптимизации измерительных процедур, а также в качестве исходных данных при разработке ИИС для технологического сопровождения процесса обработки пленочных структур.

Указанные меры позволят повысить надежность и уменьшить риск отказов бортовой аппаратуры [10, 11].

### Список литературы

1. Сергеев В. А., Резчиков С. Е. Оптимизация процедур измерения параметров низкочастотного шума со спектром вида  $1/f$  // Автоматизация процессов управления. 2016. № 4. С. 101–107.
2. Сергеев В. А., Резчиков С. Е. Методическая погрешность измерений показателя степени частотной зависимости спектра низкочастотного шума // Измерительная техника. 2015. № 10. С. 55–59.
3. Сергеев В. А., Резчиков С. Е. Адаптивные алгоритмы измерения параметров низкочастотного шума полупроводниковых приборов в условиях массового контроля // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 59–64.
4. Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Шопин Г. П., Денисюк А. А. Устройство для подгонки пленочных резисторов микросборок // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 1. С. 28–35.
5. Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Денисюк А. А. Методика комбинированной подгонки пленочных резисторов факельным разрядом // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 1. С. 3–9.
6. Новомейский Д. Н., Куликов А. В., Пиганов М. Н. Алгоритм процесса обработки пленочных структур факельным разрядом // Труды МАИ. 2019. № 109. С. 1–16. URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=111411>
7. Колпаков В. А., Новомейский Д. Н., Новоженин М. Р. Определение температуры поверхности образца в области ее взаимодействия с потоком внеэлектродной плазмы с помощью преобразования Кирхгофа квадратичной функции // Журнал технической физики. 2013. Т. 83, № 11. 9 с.
8. Казанский Н. Л., Колпаков А. И., Колпаков В. А., Паранин В. Д. Метод определения температуры поверхности в области ее взаимодействия с потоком низкотемпературной плазмы // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, № 12. С. 21–25.
9. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
10. Юрков Н. К. Современное состояние исследований в области создания высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 5–12.
11. Юрков Н. К. Модель оценивания риска отказа электронных средств длительного функционирования // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2018. № 1. С. 111–119.
12. Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Лупцов А. А., Перевертов В. П. Методика регулировки амплитудно-частотных характеристик фильтров // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 70–80.

### References

1. Sergeev V.A., Rezchikov S.E. Optimization of procedures for measuring low-frequency noise parameters with a spectrum of the type  $1/f$ . *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of control processes*. 2016;(4):101–107. (In Russ.)
2. Sergeev V.A., Rezchikov S.E. Methodological error in measuring the degree of frequency dependence of the low-frequency noise spectrum. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2015;(10):55–59. (In Russ.)
3. Sergeev V.A., Rezchikov S.E. Adaptive algorithms for measuring low-frequency noise parameters of semiconductor devices under mass control conditions. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2020;(11):59–64. (In Russ.)
4. Novomeyskiy D.N., Piganov M.N., Shopin G.P., Denisjuk A.A. Device for fitting film resistors of microassemblies. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic devices*. 2021;(1):28–35. (In Russ.)
5. Novomeyskiy D.N., Piganov M.N., Denisjuk A.A. Method of combined fitting of film resistors with flare discharge. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic means*. 2021;(1):3–9. (In Russ.)
6. Novomeyskiy D.N., Kulikov A.V., Piganov M.N. Algorithm of the process of processing film structures by flare discharge. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2019;(109):1–16. (In Russ.). Available at: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=111411>
7. Kolpakov V.A., Novomeyskiy D.N., Novozhenin M.R. Determination of the surface temperature of a sample in the field of its interaction with an off-electrode plasma flow using the Kirchhoff transform of a quadratic function. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*. 2013;83(11):9. (In Russ.)

8. Kazanskiy N.L., Kolpakov A.I., Kolpakov V.A., Pararin V.D. A method for determining surface temperature in the field of its interaction with a low-temperature plasma stream. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*. 2007;77(12):21–25. (In Russ.)
9. Samarskiy A.A., Gulin A.V. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Moscow: Nauka, 1989:432. (In Russ.)
10. Yurkov N.K. The current state of research in the field of creating highly reliable on-board electronic equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):5–12. (In Russ.)
11. Yurkov N.K. A model for assessing the risk of failure of long-term electronic devices. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii = Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 2018;(1):111–119. (In Russ.)
12. Novomeyskiy D.N., Piganov M.N., Luptsov A.A., Perevertov V.P. Methodology for adjusting the amplitude-frequency characteristics of filters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):70–80. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### **Дмитрий Николаевич Новомейский**

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

##### **Dmitry N. Novomeisky**

Postgraduate student,  
Samara National Research University  
named after Academician S.P. Korolev  
(34 Moscow highway, Samara, Russia)

##### **Михаил Николаевич Пиганов**

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

##### **Mikhail N. Piganov**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of construction  
and technology of electronic systems and devices,  
Samara National Research University  
named after Academician S.P. Korolev  
(34 Moscow highway, Samara, Russia)

##### **Ербол Токтамысович Ескибаев**

магистр, начальник кафедры тактики авиации,  
Военный институт сил воздушной обороны,  
(Казахстан, г. Актобе, пр-т Алии Молдагуловой, 39А)  
E-mail: erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru

##### **Erbol T. Eskibaev**

Master degree student,  
head of the sub-department of tactics of aviation,  
Military Institute of Air Defense Forces  
(39A Aliya Moldagulova avenue,  
Aktobe, Kazakhstan)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 18.08.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 07.09.2024**

**Принята к публикации/Accepted 07.10.2024**

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ БЕЗОПАСНОСТИ ИХ РАБОТЫ

**Е. А. Воронин**

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия  
e.voronin1@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Учет внешних угроз и воздействий при оценке надежности технических и информационных систем является критически важным для обеспечения их устойчивости и безопасности. Внешние угрозы могут быть разнообразными: от природных катастроф (землетрясения, пожары, наводнения) до действий злоумышленников (кибератаки, саботаж, вандализм). Учет этих угроз позволяет разработать системы с повышенной устойчивостью к внешним факторам, минимизируя риск сбоев и потерь. Актуальность оценки надежности технических систем в условиях безопасности в последние годы значительно возросла из-за увеличения сложности систем и повышенных требований к их устойчивости перед внешними угрозами и неисправностями. Цель работы – выбрать, разработать и обосновать методы и информационные технологии оценки безопасности сложных систем с учетом их безопасности эксплуатации. *Материалы и методы.* В работе изучены и представлены основные направления исследований в этой области: моделирование надежности, интеграция безопасности и надежности, методы анализа рисков, а также статистические методы и машинное обучение. Рассмотрены основные подходы к решению этой задачи. Показано, что оценка надежности технических систем, учитывающая риски внешних воздействий, требует комплексного подхода, который включает не только анализ собственных свойств системы, но и оценку влияния внешних факторов, нарушающих ее работоспособность. На основании изучения и анализа математических методов решения этой задачи разработаны и представлены математический метод «наивного» Байеса и метод машинного обучения сложной Байесовской сети для оценки вероятности безотказной работы сложных систем с учетом их безопасности. *Результаты и выводы.* Учет внешних угроз и воздействий при оценке надежности технических и информационных систем является критически важным для обеспечения их устойчивости и безопасности. Интеграция машинного обучения Байесовских сетей значительно повышает точность и оперативность оценки их надежности с учетом безопасности.

**Ключевые слова:** оценка, методы, обеспечение, надежность, достоверность, отказы, вероятность, безотказность, риски, алгоритмы, угрозы, безопасность, искусственный интеллект, машинное обучение, Байесовские сети доверия, ациклические графы

**Для цитирования:** Воронин Е. А. Применение технологий машинного обучения в задачах оценки и обеспечении надежности технических систем с учетом безопасности их работы // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 75–84. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-8

## THE USE OF MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES IN THE TASKS OF EVALUATING AND ENSURING THE RELIABILITY OF TECHNICAL SYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT THE SAFETY OF THEIR OPERATION

**E.A. Voronin**

Federal Research Center "Computer Science and Control" of the RAS, Moscow, Russia  
e.voronin1@gmail.com

**Abstract.** *Background.* Taking into account external threats and impacts when assessing the reliability of technical and information systems is critical to ensuring their sustainability and security. External threats can be varied: from natural disasters (earthquakes, fires, floods) to actions of intruders (cyberattacks, sabotage, vandalism). Taking these threats into account allows developing systems with increased resistance to external factors, minimizing the risk of failures and losses. The relevance of assessing the reliability of technical systems in a safe environment has increased significantly in recent years due to the increasing complexity of systems and increased requirements for their resistance to external threats and malfunctions. Purpose of the work. Select, develop and justify the methods and information

technologies for assessing the safety of complex systems, taking into account their operational safety. *Materials and methods.* The paper studies and presents the main directions of research in this area. These are: reliability modeling, integration of safety and reliability, risk analysis methods, as well as statistical methods and machine learning. The main approaches to solving this problem are considered. It is shown that the assessment of the reliability of technical systems, taking into account the risks of external influences, requires a comprehensive approach that includes not only the analysis of the system's own properties, but also an assessment of the influence of external factors that disrupt its performance. Based on the study and analysis of mathematical methods for solving this problem, the mathematical method of naive Bayes and the machine learning method of a complex Bayesian network for assessing the probability of failure-free operation of complex systems taking into account their safety are developed and presented. *Results and conclusions.* Taking into account external threats and impacts when assessing the reliability of technical and information systems is critical to ensuring their sustainability and safety. The integration of machine learning in Bayesian networks significantly increases the accuracy and efficiency of assessing their reliability taking into account safety.

**Keywords:** assessment, methods, provision, reliability, authenticity, failures, probability, reliability, risks, algorithms, threats, security, artificial intelligence, machine learning, Bayesian belief networks, acyclic graphs

**For citation:** Voronin E.A. The use of machine learning technologies in the tasks of evaluating and ensuring the reliability of technical systems, taking into account the safety of their operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(4):75–84. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-8

## Введение

Учет внешних угроз и воздействий при оценке надежности технических и информационных систем является критически важным для обеспечения их устойчивости и безопасности. Это необходимо для повышения уровня защищенности. Внешние угрозы могут быть разнообразными: от природных катастроф (землетрясения, пожары, наводнения) до действий злоумышленников (кибератаки, саботаж, вандализм). Учет этих угроз позволяет разработать системы с повышенной устойчивостью к внешним факторам, минимизируя риск сбоев и потерь.

Сбои в работе технических систем могут иметь серьезные последствия, например, отключение электроэнергии, аварии на транспорте, нарушение работы инфраструктуры. Учет внешних угроз позволяет предусмотреть меры для предотвращения подобных событий, минимизируя потенциальный ущерб.

В условиях внешних воздействий важно обеспечить непрерывность работы систем. Учет угроз позволяет разработать меры, которые позволят системе оставаться работоспособной даже в неблагоприятных условиях.

Сбои в работе технических и информационных систем могут привести к значительным финансовым потерям из-за простоя производства, потери данных, репутационных ущербов и других факторов. Учет угроз позволяет снизить эти риски.

Обзор состояния вопроса [1–26] показал, что оценка надежности с учетом безопасности сложная, многоэтапная задача системного анализа. Для ее решения необходимо знать:

- 1) методологию системного анализа и общий подход к ее решению;
- 2) алгоритм оценки безопасности технических систем с учетом их безопасности;
- 3) математические методы оценки надежности технических систем с учетом рисков внешних воздействий;
- 4) численные методы, математические модели и программное обеспечение для их реализации.

## Уточненная постановка задачи оценки и обеспечения надежности технических систем с учетом их безопасности

Актуальность оценки надежности технических систем (ТС) в условиях безопасности в последние годы значительно возросла из-за увеличения сложности систем и повышенных требований к их устойчивости перед внешними угрозами и неисправностями. Основные направления исследований в этой области:

1. Моделирование надежности: исследования на тему моделирования надежности рассматривают различные подходы, включая стохастические модели, модели на основе событий и структурные модели. Эти методы позволяют учитывать влияние внешних факторов на работу системы [1–3].
2. Интеграция безопасности и надежности: существуют работы, которые исследуют связь между надежностью и безопасностью. Это направление акцентирует внимание на том, как высокая надежность системы может снижать вероятность инцидентов безопасности, и наоборот [2].

3. Методы анализа рисков: методы количественной и качественной оценки рисков, такие как FMEA (анализ видов и последствий отказов) и FTA (анализ деревьев отказов), широко применяются для оценки надежности в контексте безопасности [3, 4].

4. Статистические методы и машинное обучение: использование статистических методов и алгоритмов машинного обучения для прогнозирования отказов и анализа надежности становится все более актуальным. Эти методы позволяют обрабатывать большие объемы данных и выявлять скрытые зависимости [4, 5].

Подходы и рекомендации:

1. Системный подход: необходимо рассматривать оценку надежности и безопасности в рамках целостной системы, учитывая взаимодействие всех компонентов и внешних факторов [1, 2].

2. Мультидисциплинарное исследование: использование знаний из различных областей, таких как механика, электроника и информационная безопасность, может привести к более точным оценкам надежности [2, 3].

3. Применение современных технологий: внедрение машинного обучения и анализа больших данных может значительно улучшить качество оценок надежности и помочь выявить новые уязвимости и риски [4, 5].

4. Постоянное обновление данных: регулярный анализ и обновление данных о состоянии системы и ее окружении помогут лучше предсказывать потенциальные отказы и угрозы [5].

Современные исследования в области оценки надежности технических систем с учетом условий безопасности ставят перед собой важные задачи адаптации к изменяющимся условиям и угрозам. Интеграция различных подходов и использование новых технологий обещают улучшить процедуры оценки надежности, что критично для обеспечения безопасной и устойчивой работы технических систем.

Оценка надежности технических систем, учитывающая риски внешних воздействий, требует комплексного подхода, который включает не только анализ собственных свойств системы, но и оценку влияния внешних факторов, которые могут нарушить ее работоспособность.

1. Идентификация и классификация внешних воздействий:

– анализ окружающей среды: определение климатических условий (температура, влажность, осадки), сейсмической активности, электромагнитных помех, уровня загрязнения и т.д., которые могут воздействовать на систему;

– анализ человеческого фактора: учет потенциальных ошибок операторов, неправильного обслуживания, несоблюдения инструкций и т.д.;

– анализ социальных и политических факторов: оценка рисков, связанных с терактами, саботажем, политическими потрясениями, конфликтами и т.д.;

– анализ технологических факторов: учет влияния других систем, с которыми взаимодействует данная система, внешних источников питания, сетевых сбоев, киберугроз и т.д.

2. Оценка вероятности и последствий внешних воздействий:

– анализ исторических данных: изучение данных о предыдущих инцидентах, связанных с воздействием подобных факторов, для оценки вероятности и серьезности возможных последствий;

– моделирование и прогнозирование: использование математических моделей для прогнозирования вероятности возникновения внешних воздействий и оценки их влияния на систему;

– экспертная оценка: привлечение экспертов в соответствующих областях для оценки вероятности и последствий внешних воздействий.

3. Анализ уязвимости системы к внешним воздействиям:

– анализ чувствительности: определение компонентов и функций системы наиболее чувствительных к внешним воздействиям;

– имитационное моделирование: проведение имитационного моделирования для оценки влияния внешних воздействий на функционирование системы в различных сценариях;

– анализ режимов отказа: идентификация возможных режимов отказа системы под воздействием внешних факторов и оценка их последствий.

4. Внедрение мер по минимизации рисков:

– проектирование для безопасности: включение в конструкцию системы мер по минимизации уязвимости к внешним воздействиям (например, защита от погодных условий, электромагнитных помех, механических повреждений);

– резервирование: внедрение резервных систем или компонентов, которые могут заменить основную систему в случае ее выхода из строя;

- системы раннего оповещения: разработка систем раннего оповещения о неблагоприятных внешних воздействиях для своевременного принятия мер;
- управление рисками: разработка планов реагирования на различные внешние воздействия, обучение персонала, управление информацией и контроль доступа.

5. Постоянный мониторинг и оценка:

- сбор данных о внешних воздействиях: отслеживание изменений в окружающей среде, деятельности человека, технологических условиях;
- обновление оценок рисков: пересмотр оценок вероятности и последствий внешних воздействий с учетом новых данных и изменений в обстановке;
- адаптация мер по минимизации рисков: введение корректировок в конструкцию, эксплуатацию или управление системой с учетом изменений в рисках.

Внедрение вышеизложенного комплексного подхода к оценке и обеспечению надежности технических систем с учетом рисков внешних воздействий позволит повысить их устойчивость и обеспечить непрерывность функционирования в сложных условиях.

Методология обеспечения и оценки надежности технических систем с учетом их безопасности предлагает системный подход.

1. Определение системы и ее контекста:

- идентификация системы: четкое определение границы системы, ее компоненты, функции и взаимодействие с другими системами;
- определение контекста: описание окружающей среды, в которой функционирует система, включая людей, процессы, другие системы и потенциальные угрозы;
- формулировка целей безопасности: установка ясной и измеримой цели безопасности для системы, которые отражают ее критичность и потенциальные риски.

2. Анализ рисков:

- идентификация опасностей: выявление всех потенциальных опасностей, которые могут привести к нарушению безопасности системы;
- оценка вероятности каждой опасности, учитывая ее источник, частоту и условия возникновения;
- оценка тяжести последствий каждого риска, исходя из потенциального ущерба, который может быть нанесен системе, людям и окружающей среде;
- оценка уровня риска для каждой опасности, используя комбинацию вероятности и тяжести последствий.

3. Анализ безопасности: определяет, как система функционирует в нормальном и аварийном режимах. Проверяется соответствие системы требованиям безопасности, нормативам и стандартам.

4. Меры по снижению рисков:

- разрабатываются меры по снижению выявленных рисков до приемлемого уровня;
- выбираются меры, которые являются эффективными и практичными, учитывая их стоимость, сложность и влияние на производительность системы;
- реализуются выбранные меры, проверяется их правильная работа и тестирование для подтверждения их эффективности.

5. Мониторинг и оценка:

- мониторинг безопасности. Регулярно отслеживается безопасность системы, чтобы выявить изменения в рисках, уязвимостях и угрозах;
- оценка эффективности. Оценивается эффективность реализованных мер по снижению рисков, и при необходимости вносятся коррективы в план безопасности;
- постоянно совершенствование системы безопасности на основе полученных данных и опыта.

Дополнительные шаги:

- документирование. Все этапы оценки безопасности должны быть задокументированы, чтобы обеспечить прозрачность и отслеживаемость процесса;
- обучение. Сотрудники, работающие с системой, должны быть обучены правилам безопасности и процедурам в случае возникновения инцидентов.

Важно отметить, что эта методология является общей схемой, и его конкретные этапы и методы могут варьироваться в зависимости от конкретной технической системы, ее критических функций и контекста использования.

### Методика решения задачи оценки надежности технических систем с учетом безопасности

Математические методы играют ключевую роль в разработке надежных и безопасных систем.

Основные математические методы оценки надежности:

1. Вероятностные модели. Вероятностные модели основываются на использовании конечных и бесконечных вероятностных пространств для описания поведения систем, их компонентов и взаимодействий. Эти модели позволяют рассчитывать вероятности отказа, выполнения заданных функций и других характеристик надежности [6, 10].

2. Теория надежности включает такие концепции, как функция надежности, функция распределения времени до отказа, а также модели, основанные на времени до первой неисправности. Здесь же используются также методы анализа временных рядов для оценки надежности систем [7, 8–10].

3. Симуляционные методы, такие как Монте-Карло, позволяют моделировать поведение сложных систем с целью оценки их надежности и устойчивости к сбоям [11].

Наиболее распространенные математические методы:

- 1) анализ деревьев отказов (FTA);
- 2) анализ режимов отказов и их последствий (FMEA);
- 3) моделирование цепей Маркова;
- 4) метод Байесовских сетей.

Первые три метода фактически являются вариантами представления Байесовских сетей.

### Общие определения и математический формализм объединения теории надежности и теории безопасности

По функциональному определению безопасность системы характеризуется отсутствием угроз и способностью ее противостоять внешним угрозам.

Формально ее определяют как вероятность отсутствия угроз и вероятность успешного противодействия им:

$$P_s(t) = 1 - P_u(t) + P_u(t)P(c), \quad (1)$$

где  $P(t)$  – вероятность угрозы;  $P(c)$  – вероятность успешного противодействия угрозе.

Очевидно, что вероятность отказа системы под воздействием угрозы будет равна

$$P_{ou}(t) = P(o|u)P_u(t), \quad (2)$$

где  $P(o|u)$  – условная вероятность отказа при реализации угрозы.

Вероятность реализации угрозы равна

$$P_{ru}(t) = 1 - P_s(t) = P_u(t)(1 - P(c)). \quad (3)$$

Естественно предположить, что отказы происходят как от внешних воздействий (угроз), так и внутренним причинам, обусловленным собственными особенностями системы. Вероятность такого типа отказов определяется на этапах производства, испытаний и эксплуатации. Обозначим ее как вероятность безотказной работы  $P_z(t)$ .

Тогда вероятность безотказной работы системы с учетом безопасности ее работы будет равна

$$P_r(t) = P_z(t)(1 - P_{ou}(t)) = P_z(t)(1 - P(o|u)P_{ru}(t)) \quad (4)$$

или

$$P_r(t) = P_z(t)(1 - P(o|u)P_u(t)(1 - P(c))). \quad (5)$$

Если система состоит из множества  $\{e_i, i=1...n\}$  элементов, на нее действует набор угроз  $\{u_j, j=1...m\}$ , вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента будет равна

$$P_{ri}(t) = P_{zi}(t) \prod_j (1 - P(o_i|u_j)P_{uj}(t)(1 - P(c_j))), \quad (6)$$

где  $P(o_i | c_j)$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента при воздействии  $j$ -й угрозы;  $P_{ri}(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента;  $P_{zi}(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента при отсутствии угроз;  $P_{uj}(t)$  – вероятность  $j$ -й угрозы;  $P(u_j)$  – вероятность отражения  $j$ -й угрозы.

Если принять допущение, что отказ любого элемента приводит к отказу системы и угрозы имеют независимое действие, то ее вероятность безотказной работы будет равна

$$P(t) = \prod_i P_{ri}(t) = \prod_i P_{zi}(t) \prod_j (1 - P(o_i | u_j) P_{uj}(t) (1 - P(c_j))). \quad (7)$$

Однако это допущение не всегда возможно. Часто угрозы имеют эффект только при совместном действии, а отказ системы происходит при отказе нескольких элементов. В этом случае необходимо изучать и моделировать сложную схему событий, т.е. строить многомерное распределение  $P(t) = P(t, u_1, u_2, u_3, \dots, u_m)$ . Лучшим методом решения этой задачи является Байесовская модель в виде Байесовской сети.

Байесовские сети (БС) становятся все более популярными в области оценки надежности технических систем, и это объясняется их важными прикладными возможностями:

- 1) моделирование неопределенности: БС позволяют эффективно представлять и обрабатывать неопределенности, возникающие в сложных системах;
- 2) учет взаимосвязей: БС обеспечивают возможность анализа зависимостей между различными компонентами системы, что помогает оценить их влияние на надежность;
- 3) моделирование вероятности неисправностей отдельных компонентов системы в зависимости от их состояния и внешних факторов [12, 14];
- 4) анализ уязвимостей: оценка вероятности успешного осуществления атак на технические системы и определение их влияния на общую надежность [13, 15, 16].

Байесовская сеть – это вероятностная модель, которая использует граф для представления наборов переменных и их условных зависимостей.

В ее логической основе лежит цепное разложение многомерного распределения вероятностей, т.е.

$$P(u_1, u_2, u_3, \dots, u_m, t) = P(u_1, t) P(u_2 | u_1, t) P(u_3 | u_1, u_2, t) \dots P(u_m | u_1, u_2, \dots, u_{m-1}, t). \quad (8)$$

Оно после оценки значений условных вероятностей и отбрасывания их незначимых значений легко представляется в виде ациклического графа, который будет реальной вероятностной моделью исходного многомерного распределения вероятностей.

Важной особенностью ее будет значительное снижение энтропии по мере Шеннона, т.е. неопределенности состояний наблюдаемой системы, а следовательно, объема информации для получения искомых закономерностей наблюдаемого процесса.

В многообразии Байесовских сетей для поставленной задачи наиболее подходящими будут Байесовские сети доверия.

Байесовские сети доверия (БСД), также известные как Bayesian Belief Networks (BBN), представляют собой графические модели, которые используются для отображения вероятностных зависимостей между переменными. Эти сети широко применяются в различных областях, таких как диагностика, принятие решений в условиях неопределенности, прогнозирование и обнаружение аномалий.

Байесовская сеть доверия состоит из следующих основных компонентов:

- **вершины (узлы)** представляют случайные переменные, которые могут быть дискретными или непрерывными;
- **ребра (дуги)** – направленные связи между вершинами, которые указывают на условные зависимости между переменными;
- **условные вероятностные таблицы (CPT)**. Для каждой вершины определяется таблица, которая описывает вероятности различных состояний этой вершины в зависимости от состояний ее родительских вершин.

Для оценки надежности с учетом безопасности эта сеть представляется из четырех уровней: уровня свидетельства угроз, уровня действия угроз, уровня отказов элементов системы и уровня отказа всей системы (рис. 1).

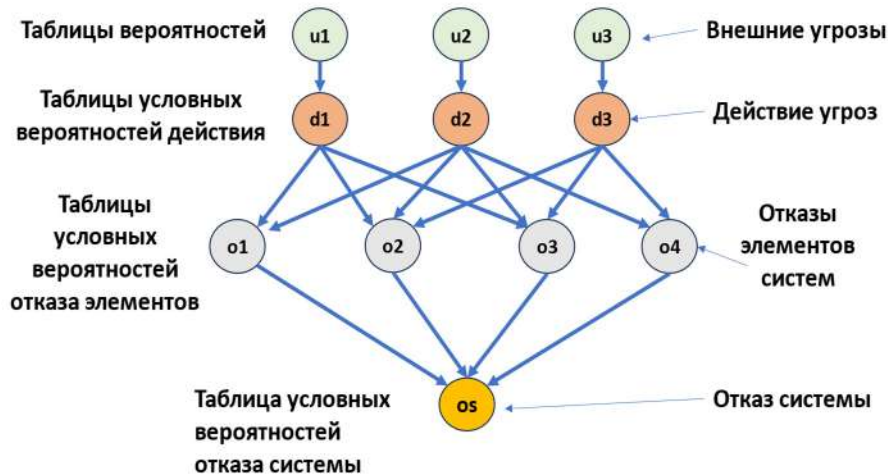


Рис. 1. Структура Байесовской сети оценки и прогнозирования надежности технических систем с учетом их безопасности

Уровень угроз представляется таблицей вероятностей угроз, а эту таблицу можно обозначить как вектор угроз  $P(u_j, j = 1 \dots m)$ .

Уровень действия представляется вектором вероятностей реализации угроз после преодоления средств защиты от них  $P(d_j, j = 1 \dots m)$ , где

$$P(d_j) = P(u_j)(1 - P_z(c_j)) . \quad (9)$$

Уровень отказа элементов характеризуется вектором вероятностей отказов, где каждая компонента вычисляется как произведение матрицы условных вероятностей элемента на вектор угроз

$$P(o_i) = A(o_i | d_j)P(d_j, j = 1 \dots m) , \quad (10)$$

где  $P(o_i | d_j, j = 1 \dots m)$  – таблица (матрица) условных вероятностей отказа  $i$ -го элемента от  $j$ -го вредоносного действия.

Уровень отказа системы характеризуется вероятностью ее отказа при всех возможных комбинациях отказов элементов соответствующей таблицей условных вероятностей ее отказа при отказах элементов  $P(o | P(o_i, i = 1 \dots n))$ .

Вероятность отказа системы вычисляется как произведение матрицы условных вероятностей от отказов элементов на вектор отказов элементов

$$P(o) = P(o | P(o_i, i = 1 \dots n))P(o_i, i = 1 \dots n) . \quad (12)$$

Этот порядок расчетов называется проходом вниз. Существует также проход вверх, который позволяет уточнить свидетельства угроз.

Основные шаги алгоритма обучения Байесовской сети:

- 1) сбор данных, которые будут использоваться для обучения. Это могут быть таблицы с угрозами и соответствующими им отказами элементов и всей системы;
- 2) определение структуры сети или как переменные в базе данных связаны друг с другом. Это может быть сделано вручную или с помощью алгоритмов, таких как PC, Grow-Shrink или др. [17, 22];
- 3) оценка параметров в виде вероятностных зависимостей, основываясь на имеющихся данных. Обычно это делается с использованием максимального правдоподобия или Байесовского вывода [18, 19, 23–25];
- 4) валидация модели. Проверяется, насколько хорошо модель предсказывает данные, используя тестовый набор данных [20, 25, 26];
- 5) совмещение БС с методами онлайн-обучения позволяет динамически адаптировать модель по мере поступления новых данных;
- 6) алгоритмы формирования и обучения Байесовских сетей доверия реализованы в виде прикладных библиотек на языках Python и Julia [21, 23].

### Заключение

Учет внешних угроз и воздействий при оценке надежности технических и информационных систем является критически важным для обеспечения их устойчивости и безопасности.

Интеграция машинного обучения в процесс построения и улучшения вероятностных оценок Байесовских сетей открывает новые горизонты в анализе данных и принятии решений. С помощью МЛ можно значительно повысить точность и надежность модели, что делает ее полезной в самых различных областях техники и безопасности.

Байесовские сети доверия, реализуемые методами машинного обучения, являются мощным аппаратом оценки, мониторинга и обеспечения надежности технических систем на всех этапах их жизненного цикла.

Представленный математический аппарат в сочетании с существующими алгоритмами и программами на языках Python и Julia позволяет оперативно и эффективно решать задачи обеспечения и оценки надежности разнообразных сложных систем.

### Список литературы

1. Lee K. L. Reliability assessment of complex systems with cybersecurity considerations // Reliability Engineering & System Safety. 2018. P. 22–28.
2. Simon P. K., Hoyt, R. A. Integrating safety and reliability assessments in engineering practices // Engineering Management Journal. 2019. P. 11–16.
3. Zhao T. A review of risk analysis methodologies in system reliability // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. P. 64–73.
4. Martin S. Data analytics for reliability assessment of safety-critical systems // Safety Science. 2021. P. 234–239.
5. Bobrov A. N., Silin E. V. Probabilistic safety assessment for complex engineering systems // International Journal of Engineering Science. 2022. P. 111–120.
6. Koller D., Friedman N. Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques. 2009. P. 76–85.
7. Cox D. R., Oakes D. Analysis of survival data. Chapman & Hall, 1995. P. 45–50.
8. Gnedenko B. V., Kovalenko A. L. The theory of reliability. Wiley, 1998. P. 61–67.
9. Maleeva M. A. A. O. S. L. Risk analysis and reliability assessment in engineering // Safety Science. 2016. P. 23–30.
10. Zhang X. Q., Liu Y. S. Probabilistic models for evaluating safety and reliability in engineering systems // Reliability Engineering and System Safety. 2020. P. 99–107.
11. Zaitsev D. V., Ivchenko S. G. Optimization of reliability and safety of technical systems based on simulation methods // Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2021. P. 42–49.
12. Patterson S. Using Bayesian Networks for Reliability Assessment of Complex Technical Systems // IEEE Transactions on Reliability. 2020. P. 33–38.
13. Fernandez D. Bayesian Networks for Vulnerability Analysis in Cybersecurity // International Journal of Information Security. 2019. P. 76–84.
14. Smirnov A., Kuznetsov I. Reliability Assessment of Systems Considering External Impacts Using Bayesian Networks // Journal of Reliability Engineering. 2021. P. 55–61.
15. City T., Gulevsky A. Integrating Bayesian Networks with Risk Analysis Methods in Engineering Systems // Nature Scientific Reports. 2022. P. 63–67.
16. Li M. Development of a Security Model for Critical Infrastructures Based on Bayesian Networks // Computers & Security. 2020. P. 41–46.
17. Heckerman D. A Tutorial on Learning with Bayesian Networks // Technical Report MSR-TR-95-06. 1995. 57 p.
18. Neapolitan R. Learning Bayesian Networks. 2004. 693 p.
19. Friedman N., Goldszmidt M. Learning Bayesian networks with local structure // Artificial Intelligence. 1996. № 85 (2). P. 241–294.
20. Koller D., Friedman N. Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques. 2009. 1233 p.
21. Ghaddar B., Jebara T. Bayesian Network Structure Learning via Neural Networks // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2019. № 33. P. 178–185.
22. Klienets S. Structure learning in Bayesian networks using machine learning methods // Machine Learning. 2020. № 109 (3). P. 124–130.
23. Agarwal R. An enhanced Bayesian parameter learning method using neural networks // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2019. P. 361–368.
24. Ivanova A. Using ensemble methods for predicting probabilities in Bayesian networks // Journal of Computational and Graphical Statistics. 2021.
25. Lee M. Contextual learning for adaptive Bayesian networks // Artificial Intelligence Review. 2022. P. 202–210.
26. Shapiro S. Interpretable Machine Learning in Bayesian Networks // Journal of Machine Learning Research. 2019. P. 130–139.

27. Voronin E. A. Assessing and optimizing the security of development strategies for small industries and agriculture in Russia in a market economy // *Reliability and quality of a complex system*. 2023. P. 123–128.
28. Voronin E. A. Assessment and selection of food safety systems // *Reliability and quality of a complex system*. 2020. P. 228–236.

### References

1. Lee K.L. Reliability assessment of complex systems with cybersecurity considerations. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018:22–28.
2. Simon P.K., Hoyt R.A. Integrating safety and reliability assessments in engineering practices. *Engineering Management Journal*. 2019:11–16.
3. Zhao T. A review of risk analysis methodologies in system reliability. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020:64–73.
4. Martin S. Data analytics for reliability assessment of safety-critical systems. *Safety Science*. 2021:234–239.
5. Bobrov A.N., Silin E.V. Probabilistic safety assessment for complex engineering systems. *International Journal of Engineering Science*. 2022:111–120.
6. Koller D., Friedman N. *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*. 2009:76–85.
7. Cox D.R., Oakes D. *Analysis of survival data*. Chapman & Hall, 1995:45–50.
8. Gnedenko B.V., Kovalenko A.L. *The theory of reliability*. Wiley, 1998:61–67.
9. Maleeva M.A. Risk analysis and reliability assessment in engineering. *Safety Science*. 2016:23–30.
10. Zhang X.Q., Liu Y.S. Probabilistic models for evaluating safety and reliability in engineering systems. *Reliability Engineering and System Safety*. 2020:99–107.
11. Zaitsev D.V., Ivchenko S.G. Optimization of reliability and safety of technical systems based on simulation methods. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2021:42–49.
12. Patterson S. Using Bayesian Networks for Reliability Assessment of Complex Technical Systems. *IEEE Transactions on Reliability*. 2020:33–38.
13. Fernandez D. Bayesian Networks for Vulnerability Analysis in Cybersecurity. *International Journal of Information Security*. 2019:76–84.
14. Smirnov A., Kuznetsov I. Reliability Assessment of Systems Considering External Impacts Using Bayesian Networks. *Journal of Reliability Engineering*. 2021:55–61.
15. City T., Gulevsky A. Integrating Bayesian Networks with Risk Analysis Methods in Engineering Systems. *Nature Scientific Reports*. 2022:63–67.
16. Li M. Development of a Security Model for Critical Infrastructures Based on Bayesian Networks. *Computers & Security*. 2020:41–46.
17. Heckerman D.A Tutorial on Learning with Bayesian Networks. *Technical Report MSR-TR-95-06*. 1995:57.
18. Neapolitan R. *Learning Bayesian Networks*. 2004:693.
19. Friedman N., Goldszmidt M. Learning Bayesian networks with local structure. *Artificial Intelligence*. 1996; (85):241–294.
20. Koller D., Friedman N. *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*. 2009:1233.
21. Ghaddar B., Jebara T. Bayesian Network Structure Learning via Neural Networks. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2019;(33):178–185.
22. Klienets S. Structure learning in Bayesian networks using machine learning methods. *Machine Learning*. 2020;(109):124–130.
23. Agarwal R. An enhanced Bayesian parameter learning method using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2019:361–368.
24. Ivanova A. Using ensemble methods for predicting probabilities in Bayesian networks. *Journal of Computational and Graphical Statistics*. 2021.
25. Lee M. Contextual learning for adaptive Bayesian networks. *Artificial Intelligence Review*. 2022:202–210.
26. Shapiro S. Interpretable Machine Learning in Bayesian Networks. *Journal of Machine Learning Research*. 2019:130–139.
27. Voronin E.A. Assessing and optimizing the security of development strategies for small industries and agriculture in Russia in a market economy. *Reliability and quality of a complex system*. 2023:123–128.
28. Voronin E.A. Assessment and selection of food safety systems. *Reliability and quality of a complex system*. 2020:228–236.

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Евгений Алексеевич Воронин

доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник,  
Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление» РАН  
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44)  
E-mail: e.voronin1@gmail.com

#### Evgeny A. Voronin

Doctor of technical sciences, professor,  
leading researcher,  
Federal Research Center "Computer Science  
and Control" of the RAS  
(44 Vavilova street, Moscow, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**

**The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 10.09.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 27.09.2024**

**Принята к публикации/Accepted 07.10.2024**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР «ПОЛИКРЕМНИЙ – ДИЭЛЕКТРИК»

Л. В. Логинова<sup>1</sup>, А. А. Трофимов<sup>2</sup>, Е. А. Печерская<sup>3</sup>, И. М. Рыбаков<sup>4</sup>, Н. А. Северцев<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>5</sup> Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

<sup>1</sup> lubascha84@mail.ru, <sup>2</sup> alex.t1978@mail.ru, <sup>3</sup> peal@list.ru, <sup>4</sup> rybakov\_im@mail.ru, <sup>5</sup> severs@ccas.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Высокотемпературные полупроводниковые датчики давления используются во многих отраслях промышленности, включая автомобильную, аэрокосмическую, авиационную и космическую. Аэрокосмические системы требуют высокоточных и надежных датчиков для измерения различных параметров, особенно абсолютного давления. *Материалы и методы.* Высокотемпературные полупроводниковые датчики давления являются одним из наиболее эффективных решений этих проблем благодаря высокой точности измерений, высокой устойчивости к воздействию внешних факторов, таких как разгерметизация, удары, вибрация и температура, а также использованию в жестких условиях эксплуатации, например, при запуске ракет в космос. *Результаты и выводы.* Создание имитационной модели полупроводникового датчика абсолютного давления, работающего при высокой температуре, для системы космической ракеты-носителя является необходимым и важным шагом в разработке сенсорного преобразователя. Разработка сенсорных датчиков требует знания влияния реальных условий эксплуатации на выходные характеристики датчика на этапе проектирования, не прибегая к дорогостоящим физическим испытаниям.

**Ключевые слова:** полупроводниковые датчики давления, моделирование, разработка, технология, надежность, поликремний – диэлектрик

**Финансирование:** исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и устройств электроники» (№ 124041700069-0).

**Для цитирования:** Логинова Л. В., Трофимов А. А., Печерская Е. А., Рыбаков И. М., Северцев Н. А. Моделирование высокотемпературных датчиков давления на базе технологических структур «поликремний – диэлектрик» // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 85–95. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-9

## MODELING OF HIGH-TEMPERATURE SENSORS PRESSURE BASED ON TECHNOLOGICAL STRUCTURES "POLYSILICON-DIELECTRIC"

L.V. Loginova<sup>1</sup>, A.A. Trofimov<sup>2</sup>, E.A. Pecherskaya<sup>3</sup>, I.M. Rybakov<sup>4</sup>, N.A. Severtsev<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>5</sup> Federal Research Center "Computer Science and Control" of the RAS, Moscow, Russia

<sup>1</sup> lubascha84@mail.ru, <sup>2</sup> alex.t1978@mail.ru, <sup>3</sup> peal@list.ru, <sup>4</sup> rybakov\_im@mail.ru, <sup>5</sup> severs@ccas.ru

**Abstract.** *Background.* High-temperature semiconductor pressure sensors are used in many industries, including automotive, aerospace, aviation, and space. Aerospace systems require highly accurate and reliable sensors to measure various parameters, especially absolute pressure. *Materials and methods.* High-temperature semiconductor pressure sensors are one of the most effective solutions to these problems due to their high measurement accuracy, high resistance to external factors such as depressurization, depressurization, shock, vibration and temperature, as well as their use in harsh operating conditions, for example, when launching rockets into space. *Results and conclusions.* Creating a simulation model of a semiconductor absolute pressure sensor operating at high temperature for a space launch vehicle system is a necessary and important step in the development of a sensor converter. The development of touch sensors requires knowledge of the effect of real-world operating conditions on the sensor output characteristics at the design stage, without resorting to expensive physical tests.

**Keywords:** semiconductor pressure sensors, modeling, development, technology, reliability, polysilicon dielectric

**Financing:** the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project "Synthesis and Research of Promising Nanomaterials, Coatings and Electronics Devices" (No. 124041700069-0).

**For citation:** Loginova L.V., Trofimov A.A., Pecherskaya E.A., Rybakov I.M., Severtsev N.A. Modeling of high-temperature sensors pressure based on technological structures "polysilicon-dielectric". *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):85–95. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-9

Высокотемпературные полупроводниковые датчики давления используются во многих отраслях промышленности, включая автомобильную, аэрокосмическую, авиационную и космическую [1, 2].

Аэрокосмические системы требуют высокоточных и надежных датчиков для измерения различных параметров, особенно абсолютного давления. Высокотемпературные полупроводниковые датчики давления являются одним из наиболее эффективных решений этих проблем благодаря высокой точности измерений, высокой устойчивости к воздействию внешних факторов, таких как разгерметизация, удары, вибрация и температура, а также к использованию в жестких условиях эксплуатации, например, при запуске ракет в космос [3, 4].

Создание имитационной модели полупроводникового датчика абсолютного давления, работающего при высокой температуре, для системы космической ракеты-носителя является необходимым и важным шагом в разработке сенсорного преобразователя.

Разработка сенсорных датчиков требует знания влияния реальных условий эксплуатации на выходные характеристики датчика на этапе проектирования, не прибегая к дорогостоящим физическим испытаниям.

При разработке датчиков давления на основе технологической структуры «поликремний – диэлектрик» из-за трудностей, связанных с трудоемкостью технологического процесса, особую роль в процессе проектирования играют методы имитационного моделирования, использование которых позволяет существенно сократить время и затраты на разработку датчиков давления [5, 6]. Имитационное моделирование позволяет совместить во времени характеристики влияния различных начальных условий эксплуатации, материалов и возмущающих факторов.

Имитационное моделирование заключается в создании трехмерной компьютерной модели и проведении исследования с использованием методов инженерного анализа [7, 8]. Методы инженерного анализа основаны на создании соответствующей математической модели объекта, поэтому и используют численные методы, позволяющие рассчитывать динамические или статические режимы в зависимости от влияния внешних факторов. Кроме того, имитационное моделирование позволяет учесть комплексное воздействие внешних факторов, таких как давление, тепло, течения и т.д., что невозможно при аналитических расчетах.

Целью работы является моделирование влияния рабочей температуры и давления на твердотельную модель высокотемпературного датчика давления на основе полупроводникового чувствительного элемента (ПЧЭ) в виде тонкой пленки со структурой «поликремний – диэлектрик» и различной геометрией и графической зависимости температурного распределения области эпифиза, относительной деформации и прогиба пленки от рабочего давления.

В рамках проводимых исследований были решены два вопроса:

- 1) моделирование поля распределения температуры полупроводниковых датчиков давления с чувствительными элементами на основе технической структуры «поликремний – диэлектрик»;
- 2) моделирование влияния номинального давления на ПЧЭ для определения относительной деформации и смещения его мембраны.

В зависимости от поставленной задачи граничные условия зависят от решаемой проблемы.

**Граничные условия первой задачи** – моделирование воздействия рабочих температур с целью получения тепловой картины.

Для реализации данной задачи использовались граничные условия, изображенные на рис. 1.

Моделирование распределения температурных полей проводилось только при одном варианте исполнения чувствительного элемента, так как между исполнениями чувствительного элемента нет значительных отличий, и они не влияют на результат.

**Граничные условия второй задачи** – моделирование воздействия номинального давления с целью определения относительной деформации и перемещения мембраны ПЧЭ.

Для определения значений перемещения, относительной деформации, использовались граничные условия, изображенные на рис. 2.

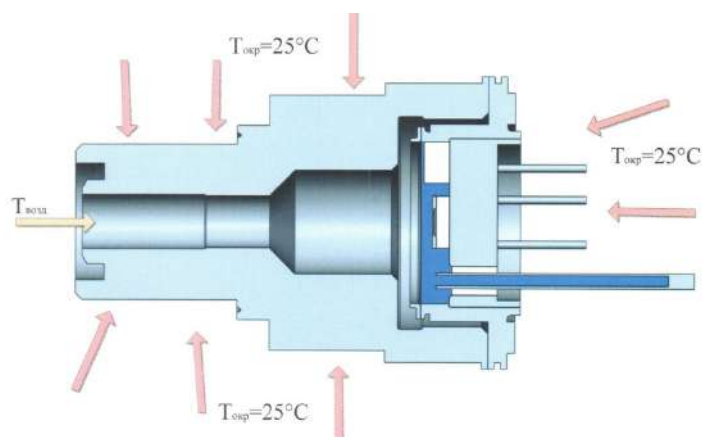


Рис. 1. Граничные условия для моделирования распределения температурных полей. Диапазон воздействующих температур ( $T_{\text{возд}}$ ) составляет от минус 50 до +250 °С

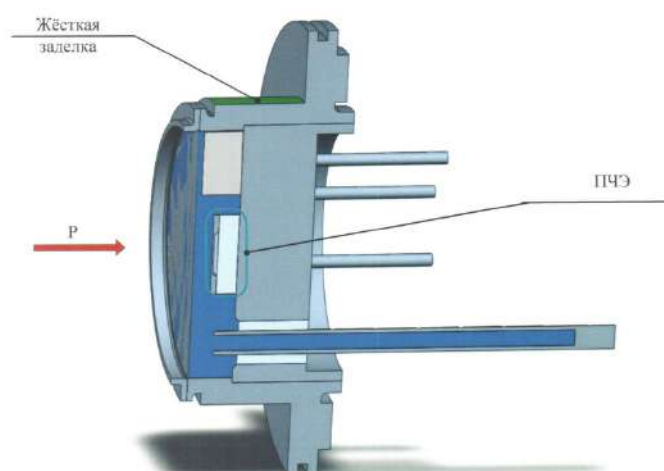


Рис. 2. Схема граничных условий для определения перемещений и относительной деформации

Оценка результатов напряженно-деформированного состояния расчетной модели показала, что данный вид граничных условий не подходит для решения поставленной задачи. Жидкость ведет себя как твердое тело, вследствие чего происходит неполная передача воздействующего давления. Исходя из условия несжимаемости жидкости и, как следствие, условия передачи величины воздействующего давления, использовались граничные условия, изображенные на рис. 3.

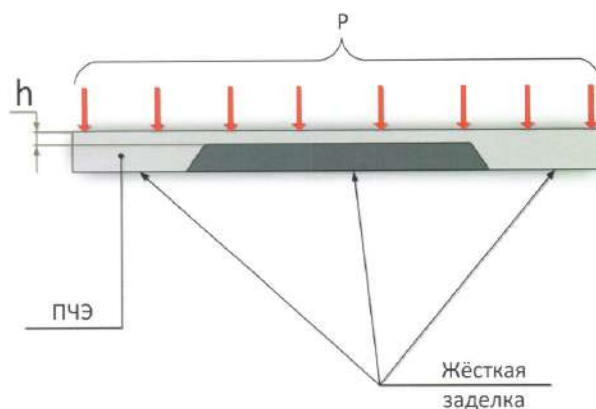


Рис. 3. Схема граничных условий

ПЧЭ имеет несколько вариантов исполнения: без жесткого центра (ЖЦ) (рис. 3), с жестким центром (рис. 4,а), с несколькими жесткими центрами (рис. 4,б).

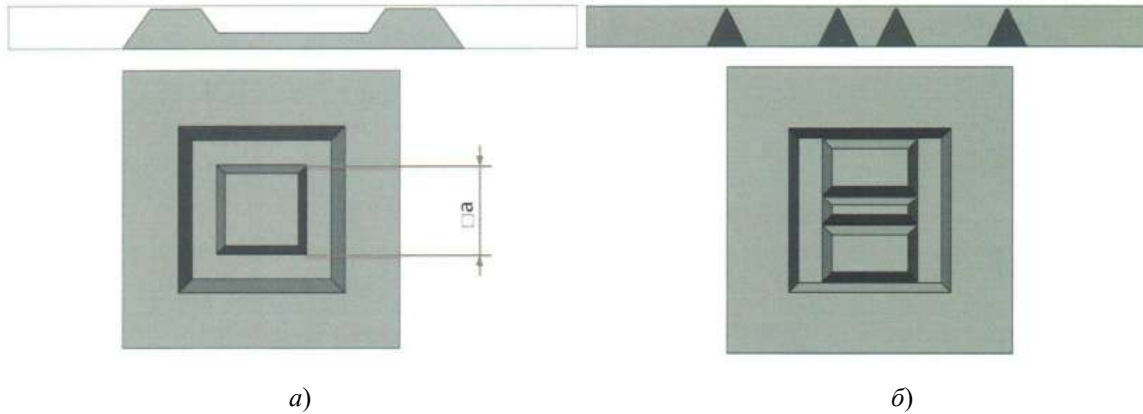
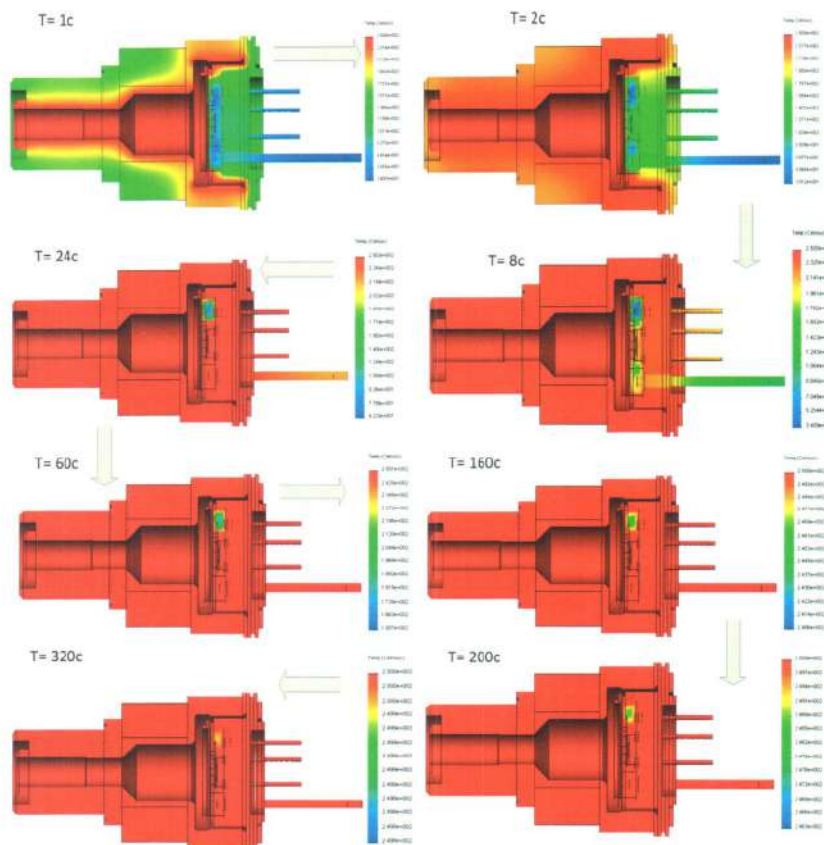


Рис. 4. Варианты исполнения ПЧЭ

### Результаты расчета

Сложность конечно-элементного моделирования данной задачи заключается в том, что чувствительный элемент находится в жидкости (ПМС-10) и отделен от рабочей среды кремниевой мембраной. При разбиении всего объема жидкости, в котором находится чувствительный элемент, на элементарные объемы (конечные элементы) в конечно-элементной сетке получается большое количество узлов и степеней свободы, что потенциально может привести к образованию областей сингулярности. Кремниевая пленка выполнена в виде оболочки, толщина которой значительно меньше ее диаметра. В результате сетка конечных элементов состоит из оболочечных конечных элементов и конечных элементов «реального» объема.

**Результаты расчета первой задачи.** Моделирование при температуре окружающей среды  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{окр}} = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), в приемную полость датчика подается температура воздействия ( $T_{\text{возд}}$ ). На рис. 5 изображена эпюра распределения температурных полей в зависимости от времени воздействия  $T_{\text{возд}} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .


 Рис. 5. Поля распределения температуры  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$

Согласно рис. 5 выравнивание температурных полей происходит приблизительно через 320 с. Жидкость ПМС-10 имеет малую теплопроводность (0,167 Вт/мК), поэтому процесс ее нагрева протекает относительно медленно. На промежутке времени  $T = 320$  с минимальное значение температуры согласно эпюре составляет  $+249,8$  °С.

На рис. 6 изображена эпюра распределения температурных полей в зависимости от времени воздействия температуры минус 50 °С. Согласно рис. 6, выравнивание температурных полей под действием температуры минус 50 °С происходит приблизительно за 260 с. Минимальная температура на данном промежутке времени составляет минус 49,7 °С.

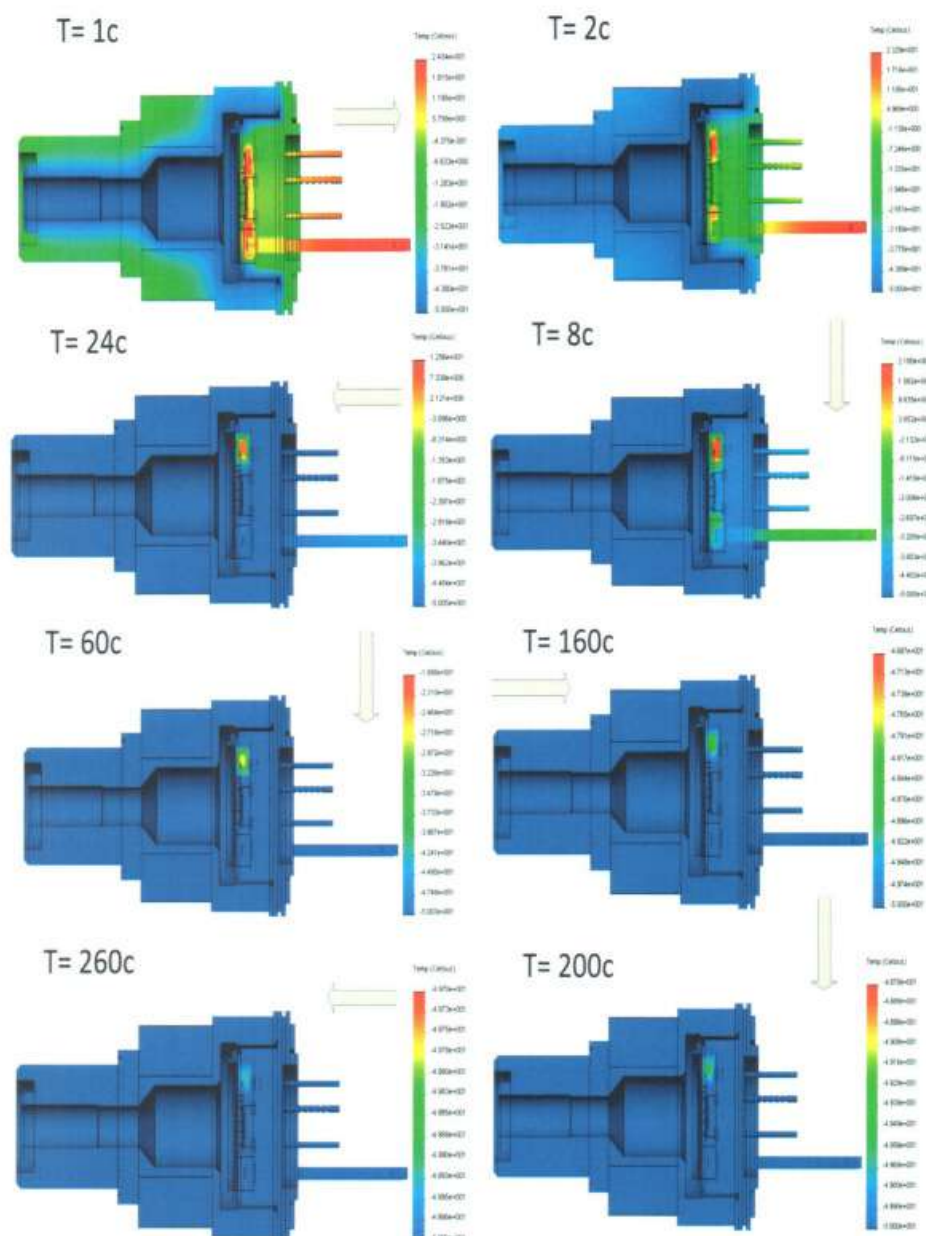


Рис. 6. Поля распределения температуры минус 50 °С

### Результаты расчета второй задачи

Диапазон воздействующих давлений составляет 0–12,5 МПа (в зависимости от варианта исполнения чувствительного элемента). На рис. 7 изображена эпюра относительной деформации в зависимости от варианта исполнения ПЧЭ, а также область снятия значений деформации и перемещения, необходимых для построения графических зависимостей.

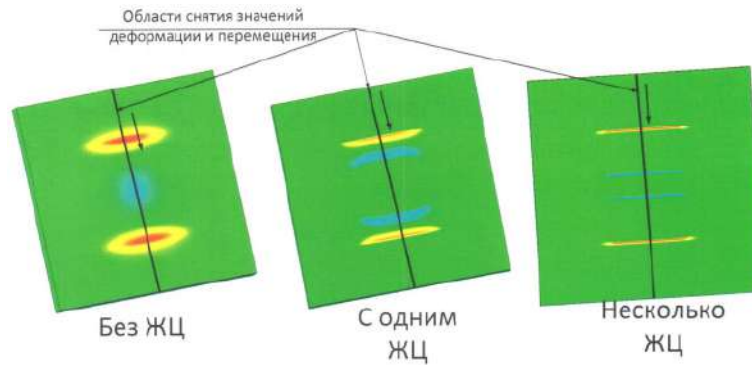


Рис. 7. Эпюра относительной деформации в зависимости от варианта ПЧЭ

### Результаты расчета ПЧЭ исполнения без ЖЦ в зависимости от толщины мембраны $h$ и действующего давления

На рис. 8 и 9 изображены графики относительной радиальной, тангенциальной деформации, график перемещения мембраны ПЧЭ исполнения без ЖЦ с толщиной мембраны  $h = 0,02$  мм.

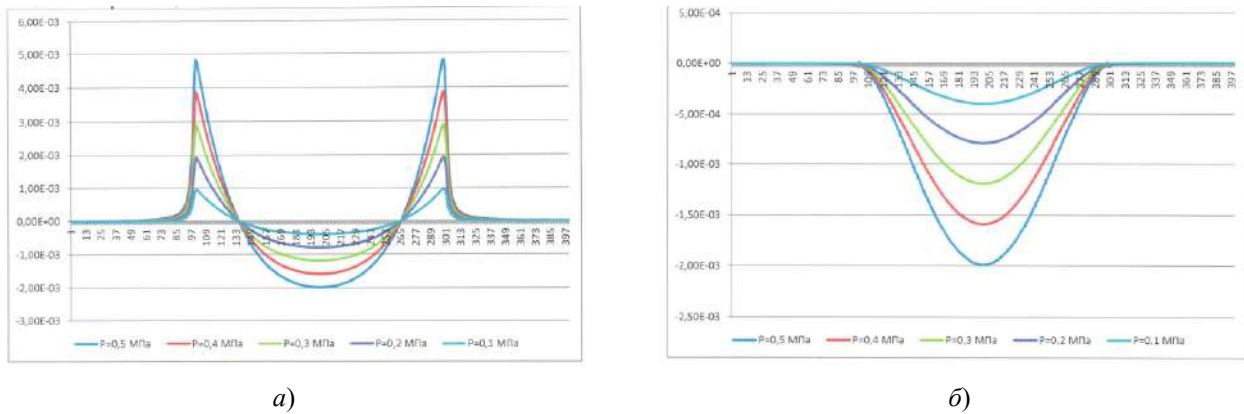


Рис. 8. Графики деформации ПЧЭ:

$a$  – график относительной радиальной деформации ПЧЭ без ЖЦ с толщиной мембраны  $h = 0,02$  мм под действием давления;  $b$  – график относительной тангенциальной деформации ПЧЭ без ЖЦ с толщиной мембраны  $h = 0,02$  мм под действием давления

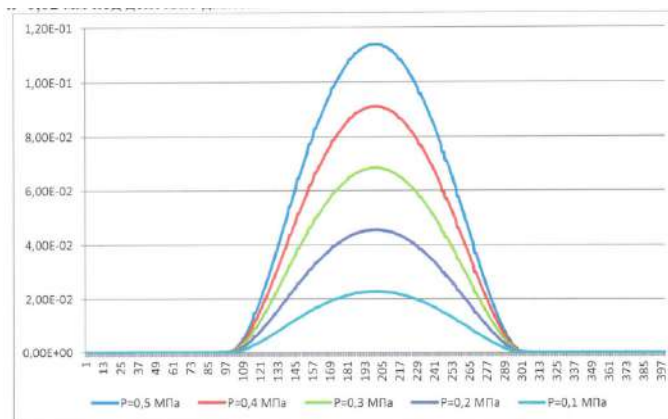


Рис. 9. График перемещения ПЧЭ без ЖЦ с толщиной мембраны  $h = 0,02$  мм под действием давления

### Результаты расчета ПЧЭ исполнения с ЖЦ в зависимости от толщины мембраны $h$ и действующего давления

На рис. 10 и 11 изображены графики относительной радиальной, тангенциальной деформации, график перемещения мембраны ПЧЭ исполнения с ЖЦ и толщиной мембраны  $h = 0,02$  мм.

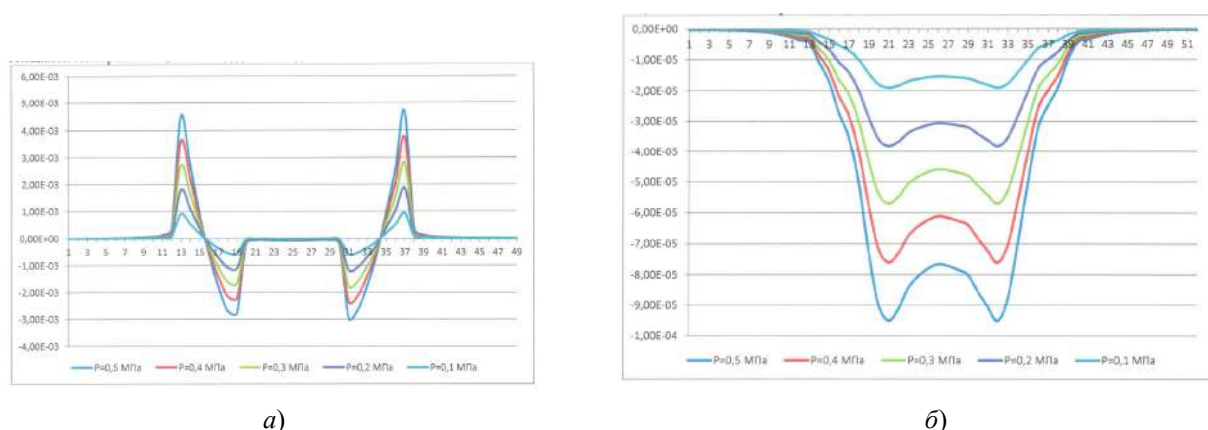


Рис. 10. Графики деформации мембраны ПЧЭ:  
 а – график относительной радиальной деформации ПЧЭ с ЖЦ с толщиной мембраны  $h = 0,02$  мм под действие давления; б – график относительной тангенциальной деформации ПЧЭ с ЖЦ и толщиной мембраны  $h = 0,02$  мм под действием давления

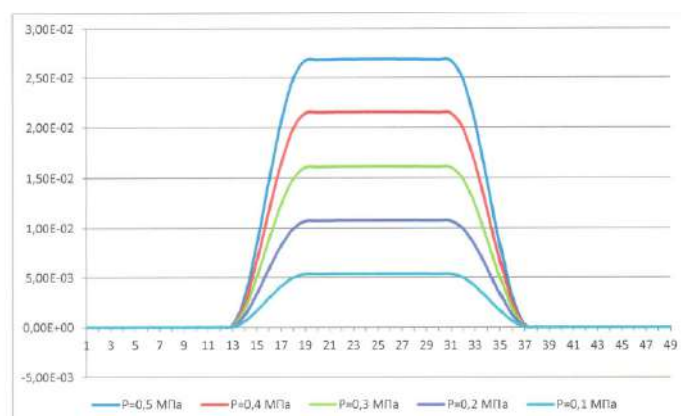


Рис. 11. График перемещения ПЧЭ с ЖЦ с толщиной мембраны  $h = 0,02$  мм под действием давления

### Результаты расчета ПЧЭ исполнения с ЖЦ в зависимости от величины ЖЦ

На рис. 12 и 13 изображены графики относительной радиальной, тангенциальной деформации, график перемещения мембраны ПЧЭ исполнения с ЖЦ в зависимости от величины ЖЦ (размер «а» согласно рис. 4). На данных рисунках изображены графики для величины «а» = 0,5–1,1 мм. Для величины «а» = 1,2–1,5 мм графики относительной радиальной и тангенциальной деформации, а также перемещения изображены на рис. 13–15. Такое разбиение вызвано особенностью геометрии и, как следствие, наблюдается создание отличной сетки конечных элементов.

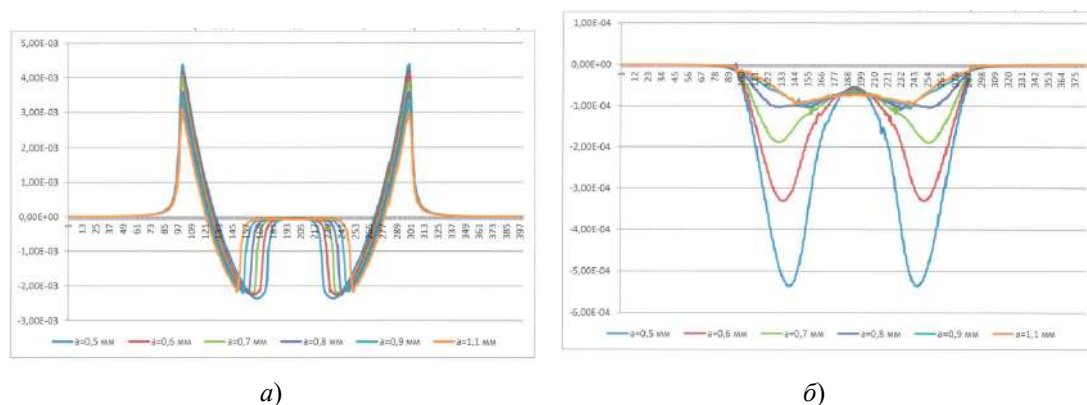


Рис. 12. Графики деформации в зависимости от величины ЖЦ:  
 а – график относительной радиальной деформации в зависимости от величины ЖЦ под действием давления 0,5 МПа («а» = 0,5–1,1 мм); б – график относительной тангенциальной деформации в зависимости от величины ЖЦ под действием давления 0,5 МПа («а» = 0,5–1,1 мм)

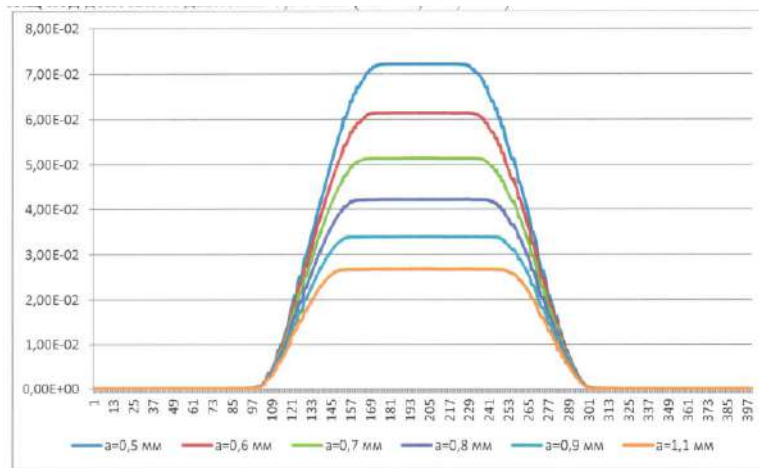
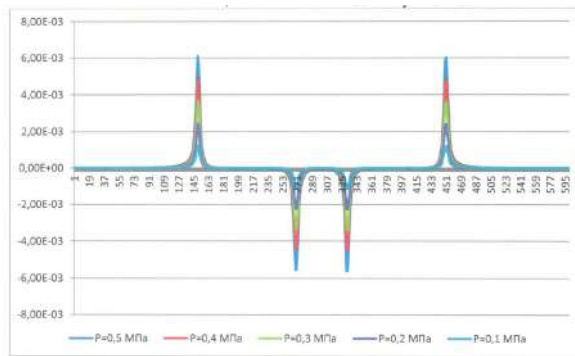
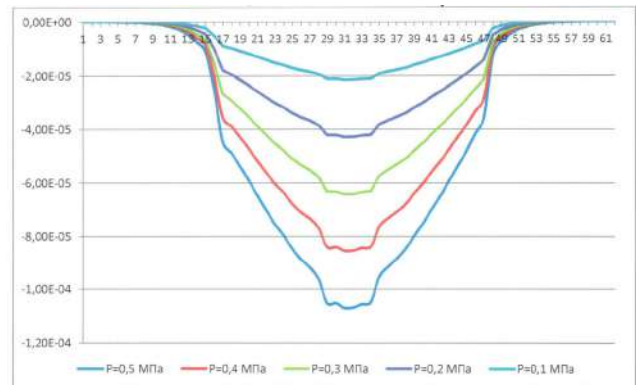


Рис. 13. График перемещения мембраны в зависимости от величины ЖЦ под действием давления 0,5 МПа («а» = 0,5–1,1 мм)

На рис. 14 и 15 изображены графики относительной радиальной, тангенциальной деформации и график перемещения мембраны ПЧЭ в зависимости от действующего давления.



а)



б)

Рис. 14. Графики деформации ПЧЭ в зависимости от действующего давления:  
а – график относительной радиальной деформации ПЧЭ исполнения с несколькими ЖЦ в зависимости от действующего давления; б – график относительной тангенциальной деформации ПЧЭ исполнения с несколькими ЖЦ в зависимости от действующего давления

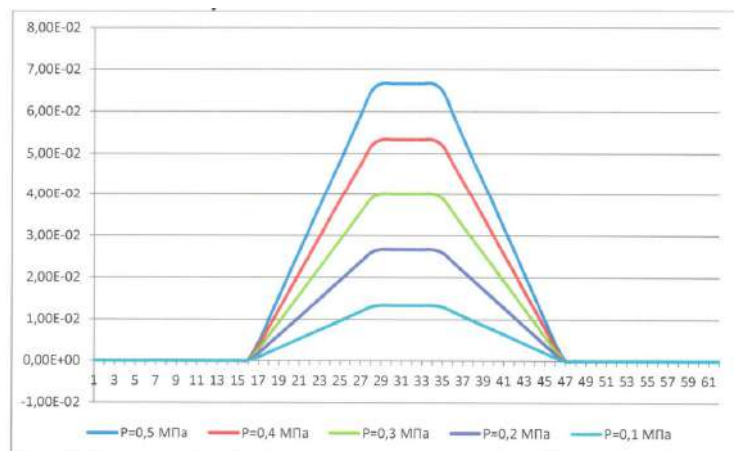


Рис. 15. График перемещения ПЧЭ исполнения с несколькими ЖЦ в зависимости от действующего давления

### Заключение

В ходе моделирования были решены все поставленные задачи.

Под действием рабочей температуры минус 50 °С выравнивание температурных полей происходит через 260 с; при воздействии температуры +250 °С выравнивание температурных полей происходит через 320 с.

Значение относительной радиальной деформации для ПЧЭ исполнения без ЖЦ, в зависимости от толщины мембраны, находится в диапазоне от 0,0062 до 0,0046 для области растяжения и от –0,0043 до –0,002 для области сжатия. Значение относительной тангенциальной деформации – от –0,0043 до –0,002; перемещения – от 0,120 до 0,029 мм.

Значение относительной радиальной деформации для ПЧЭ исполнения с ЖЦ, в зависимости от действующего давления, находится в диапазоне от 0,0045 до 0,0028 для области растяжения и от –0,0036 до –0,0021 для области сжатия; значение относительной тангенциальной деформации – от –0,0011 до –0,00009; перемещения – от 0,026 до 0,012 мм.

Значение относительной радиальной деформации для ПЧЭ исполнения с ЖЦ, в зависимости от величины ЖЦ, находится в диапазоне от 0,0043 до 0,0022 для области растяжения и от –0,0022 до –0,0018 для области сжатия; значение относительной тангенциальной деформации – от –0,0005 до –0,00009; перемещения – от 0,072 до 0,005 мм.

Значение относительной радиальной деформации для ПЧЭ исполнения с несколькими ЖЦ, в зависимости от действующего давления, находится в диапазоне от 0,0061 до 0,001 для области растяжения и от –0,0057 до –0,0009 для области сжатия; значение относительной тангенциальной деформации – от –0,0001 до –0,00002; перемещения – от 0,066 до 0,013 мм.

### Список литературы

1. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.
2. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Бастрыгин К. И. [и др.]. Имитационное моделирование высокотемпературного пьезоэлектрического датчика быстропеременных давлений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 2. С. 59–66.
3. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 18–25.
4. 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.
5. 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.
6. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование тензорезисторного датчика избыточных давлений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 56–63.
7. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М. : ДМК Пресс, 2010. 464 с.
8. Рыбаков И. М. Модели и методы измерения электрических параметров в сложных системах электроники // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 44–50.
9. 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.
10. Пономарев В. Н., Трофимов А. А., Дерябин Д. В. [и др.]. Проектирование датчика температуры методом имитационного моделирования // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 55–61.

### References

1. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. et al. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2017;(1):20–28. (In Russ.)
2. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Bastrygin K.I. et al. Simulation modeling of a high-temperature piezoelectric pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2018;(2):59–66. (In Russ.)
3. 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.)
4. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement, monitoring and control systems based on them for technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems.* 2012;(9):4–6. (In Russ.)

5. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation of a sensitive element of a string-type pressure sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2014;(7):22–25. (In Russ.)
6. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a tensoresistor overpressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(1):56–63. (In Russ.)
7. Alyamovskiy A.A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation = Engineering calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press, 2010:464. (In Russ.)
8. Rybakov I.M. Models and methods of measuring electrical parameters in complex electronic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):44–50. (In Russ.)
9. Kikot V.V., Danilova E.A., Trofimov A.A., Zhukov T.O. Investigation of the effect of elevated temperature on the technical characteristics of piezoelectric elements made of ceramics such as lead zirconate-titanate. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):83–89. (In Russ.)
10. Ponomarev V.N., Trofimov A.A., Deryabin D.V. et al. Designing a temperature sensor by simulation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):55–61. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Любовь Викторовна Логинова

документовед кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: lubascha84@mail.ru

#### 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

#### Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: peal@list.ru

#### Илья Михайлович Рыбаков

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

#### Николай Алексеевич Северцев

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки и техники РФ,  
главный научный сотрудник отдела управления  
робототехническими устройствами,  
Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление» РАН  
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44)  
E-mail: severs@ccas.ru

#### Lyubov V. Loginova

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

#### Aleksey A. Trofimov

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

#### Ekaterina A. Pecherskaya

Doctor of technical sciences, professor,  
head of the sub-department of information  
and measurement technology and metrology,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Ilya M. Rybakov

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

#### Nikolay A. Severtsev

Doctor of technical sciences, professor,  
honored worker of science and technology  
of the Russian Federation,  
chief researcher of the department  
of control of robotic devices,  
Federal Research Center "Computer Science  
and Control" of the RAS  
(44 Vavilova street, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 12.08.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 16.09.2024**

**Принята к публикации/Accepted 07.10.2024**

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Б. С. Бейсембаева<sup>1</sup>, В. Д. Ежижанский<sup>2</sup>, А. Е. Яркин<sup>3</sup>, Е. А. Асеев<sup>4</sup>, Н. С. Реута<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

<sup>2, 3, 4, 5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> b.beisembayeva@agakaz.kz, <sup>2</sup> ejjvd@gmail.com, <sup>3</sup> c.chicony@mail.ru, <sup>4</sup> ra4for@yandex.ru, <sup>5</sup> saparap@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Проблема теплоотвода является одной из самых главных трудностей в обеспечении надежности и качества сложных электронных систем. Тепло, выделяющееся в процессе работы устройств радиоэлектронной техники, негативно сказывается на ее характеристиках, уменьшает срок службы устройства и увеличивает количество отказов. Для борьбы с этим явлением существуют различные методы и средства. *Материалы и методы.* Представлен обзорный анализ некоторых существующих систем обеспечения теплового режима. Они сравниваются по таким характеристикам, как максимальная мощность рассеиваемого теплового потока и тип используемого теплоносителя. *Результаты и выводы.* Эффективное охлаждение не только увеличивает срок службы устройства, но и обеспечивает более стабильную работу, что может привести к повышению производительности и уменьшению количества сбоев. Поэтому выбор правильного метода охлаждения является ключевым фактором в обеспечении надежности и качества работы электронного оборудования.

**Ключевые слова:** тепловой режим, методы обеспечения, кондукция, конвекция, излучение, удельная мощность, отведение тепла, фазовый переход

**Для цитирования:** Бейсембаева Б. С., Ежижанский В. Д., Яркин А. Е., Асеев Е. А., Реута Н. С. Методы и средства обеспечения теплового режима радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 96–102. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-10

## METHODS AND MEANS OF ENSURING THE THERMAL REGIME OF ELECTRONIC EQUIPMENT

B.S. Beysembayeva<sup>1</sup>, V.D. Ezhizhanskiy<sup>2</sup>, A.E. Yarkin<sup>3</sup>, E.A. Aseev<sup>4</sup>, N.S. Reuta<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan

<sup>2, 3, 4, 5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> b.beisembayeva@agakaz.kz, <sup>2</sup> ejjvd@gmail.com, <sup>3</sup> c.chicony@mail.ru, <sup>4</sup> ra4for@yandex.ru, <sup>5</sup> saparap@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The problem of heat sink is one of the main difficulties in ensuring the reliability and quality of complex electronic systems. The heat generated during the operation of electronic devices negatively affects its characteristics, reduces the service life of the device and increases the number of failures. There are various methods and means to combat this phenomenon. *Materials and methods.* This article presents an overview analysis of some existing thermal management systems. They are compared according to such characteristics as the maximum power of the dissipated heat flow and the type of coolant used. *Results and conclusions.* Efficient cooling not only increases the service life of the device, but also ensures more stable operation, which can lead to increased productivity and fewer failures. Therefore, choosing the right cooling method is a key factor in ensuring the reliability and quality of electronic equipment.

**Keywords:** thermal regime, maintenance methods, conduction, convection, radiation, specific power, heat dissipation, phase transition

**For citation:** Beysembayeva B.S., Ezhizhanskiy V.D., Yarkin A.E., Aseev E.A., Reuta N.S. Methods and means of ensuring the thermal regime of electronic equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(4):96–102. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-10

### Введение

Одной из основных тенденций развития современной радиоэлектронной аппаратуры является микроминиатюризация. При этом вычислительные мощности техники только растут, и это приводит

к значительному увеличению мощности на единицу объема (удельной мощности) радиоаппаратуры. Так как ни одно устройство не обладает стопроцентным коэффициентом полезного действия (КПД), то потребляемая мощность в некоторой мере (в зависимости от КПД) выделяется в виде тепла.

Перегрев электрорадиоэлементов (ЭРЭ) приводит к значительным изменениям в их работе: изменяется сопротивление резисторов (что приводит к изменению токов в цепях) и смещается вольт-амперная характеристика полупроводниковых приборов (что напрямую влияет на работу логических схем).

Для обеспечения оптимального теплового режима в радиоэлектронной аппаратуре используется специальный комплекс мер и компонентов, так называемая система обеспечения теплового режима (СОТР).

### Системы обеспечения теплового режима

СОТР предназначена для контроля и поддержания температуры в промышленных и бытовых устройствах. СОТР можно классифицировать по ряду признаков, таких как диапазон допустимых температур, основной вид теплопередачи, род рабочего вещества, охват узлов аппарата и другим, представленным на рис. 1.

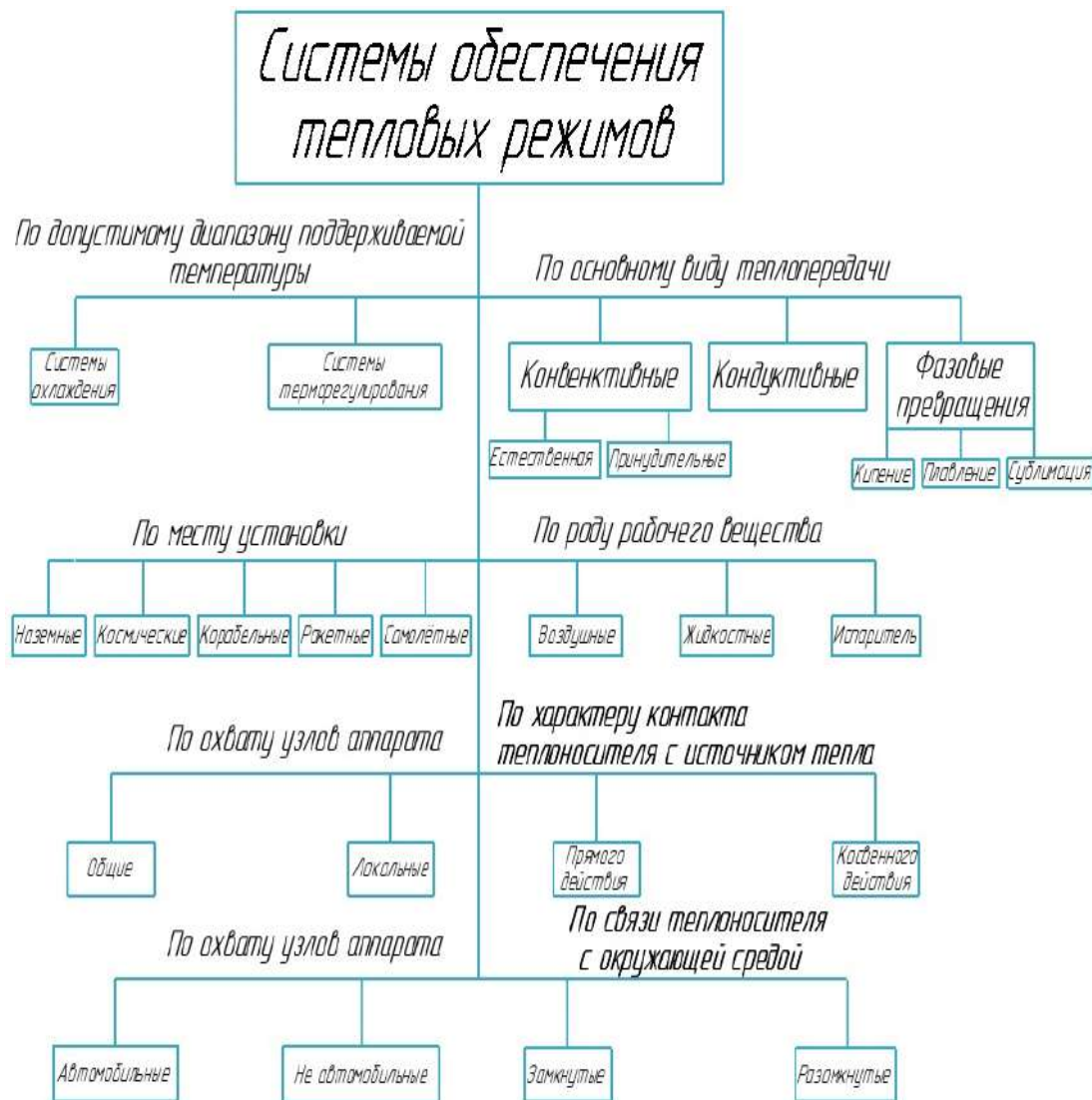


Рис. 1. Классификация систем обеспечения теплового режима

Существует несколько различных методов и средств, которые позволяют обеспечить правильный тепловой режим для работы рассматриваемого радиоэлектронного средства (РЭС). Одним из часто применяемых методов являются системы охлаждения.

### Системы охлаждения

Системы охлаждения необходимо использовать в тех случаях, когда температура элементов превосходит максимальную допустимую температуру и от ЭРЭ необходимо отводить тепло или же когда в устройстве используются элементы, обладающие диапазоном температур, значительно отличающимся от диапазона рабочих температур других элементов данного РЭС.

Воздушные системы охлаждения в РЭС находят очень обширное применение. Это связано с его простотой и экономичностью. Используются как естественное, так и принудительное воздушное охлаждение. Охлаждение за счет естественной конвекции обеспечивает тепловой поток, отводимый от аппарата до  $200 \text{ Вт/м}^2$ . Чтобы увеличить теплообмен, применяется ряд мер: перфорация корпуса устройства, использование жалюзи и оребрение корпуса. Эти средства позволяют снизить температуру внутри аппарата на 20–30 % по сравнению с полностью герметичным корпусом [1].

Принудительное воздушное охлаждение используется в случаях, когда требуется отводить плотность тепловых потоков до  $2\text{--}3 \text{ кВт/м}^2$ . Для создания принудительных потоков воздуха используются вентиляторы или компрессоры. Существует два способа охлаждения: обдув внешней поверхности корпуса устройства и прогон воздуха через внутреннюю полость.

Второй способ считается более эффективным, так как позволяет напрямую отводить тепло от сильно нагреваемых компонентов и узлов. Однако при этом необходимо предварительно очищать и сушить воздух, для чего используются фильтры. Системы прогона воздуха через внутреннюю полость можно разделить на приточные (воздух нагнетается в устройство), вытяжные и приточно-вытяжные.

Еще одной системой охлаждения является жидкостная. Выделяют термосифонные системы и системы с принудительной циркуляцией теплоносителя. Они могут воздействовать на систему напрямую или косвенно и работать по замкнутому или разомкнутому циклу.

В термосифонной системе (рис. 2,а) происходит естественная циркуляция жидкости благодаря различию ее плотности на входе и выходе из устройства. Затем жидкость остывает в специальном контейнере путем испарения и теплообмена корпуса контейнера с окружающей средой. Эффективность данной системы довольно низка и плотность теплового потока может составлять от  $10^3$  до  $10^4 \text{ Вт/м}^2$  [2].

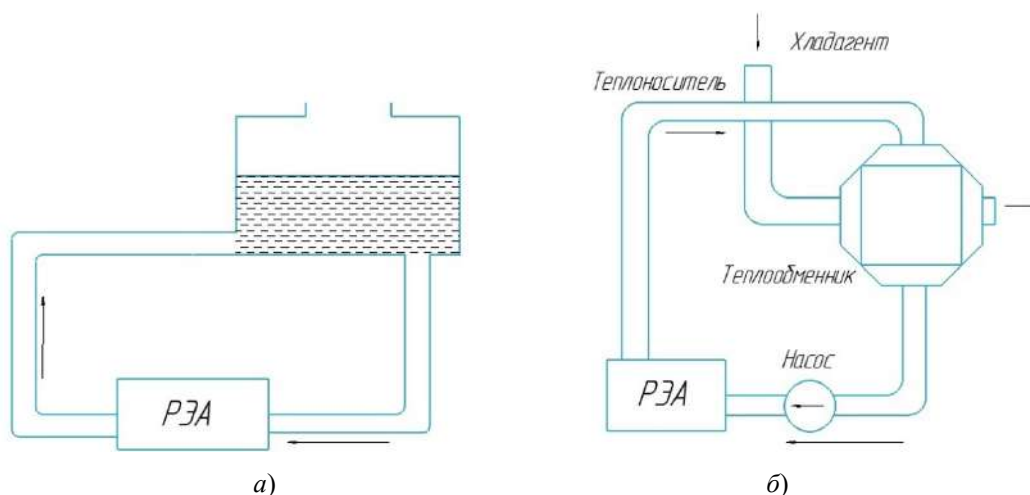


Рис. 2. Жидкостные системы охлаждения:

а – термосифонная; б – с принудительной циркуляцией теплоносителя

В системах охлаждения с принудительной циркуляцией (рис. 2,б) жидкость приводится в движение специализированными устройствами – насосами или помпами. Для охлаждения жидкости используется специальный теплообменник. Как правило, эти системы работают по герметичному контуру [3]. В таких системах жидкость служит промежуточным звеном в процессе теплопередачи между радиоэлектронным устройством и теплообменником, представляющим собой радиатор. В системах охлаждения такого типа температура кипения используемой жидкости должна превышать предельно допустимую температуру для теплонагруженных компонентов. Системы с принудительной циркуляцией теплоносителя весьма эффективны, так как мощность теплового потока, отводимого с нагретой поверхности, может достигать  $5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ .

Если плотность теплового потока велика и может достигать значений свыше  $5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, то используются испарительные системы, в которых отвод тепла опирается на процесс кипения жидкости. Схема, представленная на рис. 3, является примером жидкостно-испарительной системы.

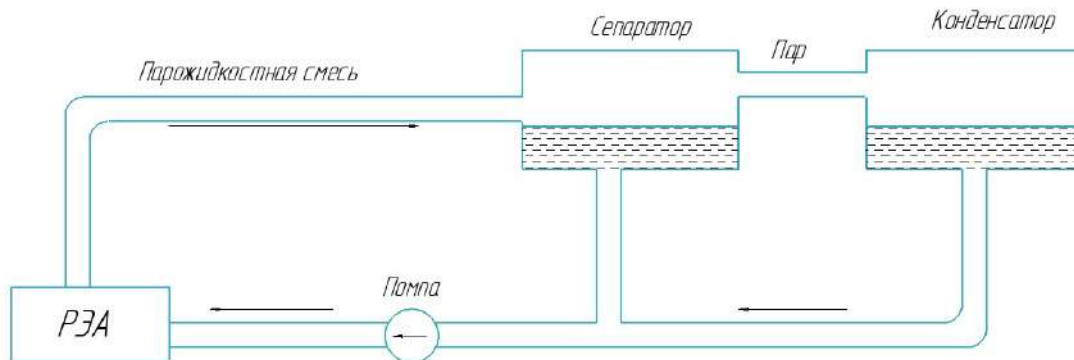


Рис. 3. Жидкостно-испарительная система охлаждения

Жидкость, проходящая через аппарат, испаряется при контакте с нагретой поверхностью. Смесь пара и жидкости затем попадает в сепаратор, где они разделяются: пар идет в конденсатор (теплообменник), а образующийся конденсат стекает и объединяется с жидкостью из сепаратора для повторения цикла [4].

Кроме систем охлаждения с использованием испарения жидкости, также применяются системы охлаждения с использованием газа (рис. 4). В этих системах нагретые поверхности охлаждаются потоком газа, который содержит мелкие капли жидкости [5].

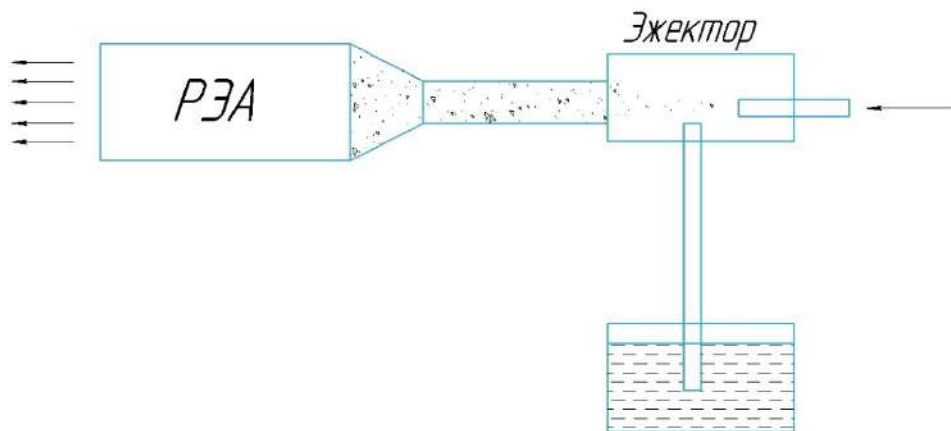


Рис. 4. Газоиспарительное охлаждение

Здесь охлаждение происходит за счет конвекции и испарения капель жидкости, которая оседает на нагретой поверхности. Эффективность газовых систем охлаждения меньше, чем жидкостных, но больше, чем воздушных [6].

Кондуктивное тепло передается через прямой контакт между двумя материалами различной температуры. Этот механизм теплопередачи играет важную роль в работе всех описанных систем охлаждения, так как обеспечивает перенос тепла от источника к охлаждаемым объектам или поверхностям [7].

Однако здесь кондукция не является основным фактором, определяющим название системы. Вместо этого, там действуют другие механизмы теплообмена с более высокой интенсивностью, которые обеспечивают перенос тепловой энергии. Конструктивное охлаждение используется для общего охлаждения в блоках с высокой плотностью монтажа и большим объемом тепловых потоков [8].

Принцип кондуктивного охлаждения представлен на рис. 5.

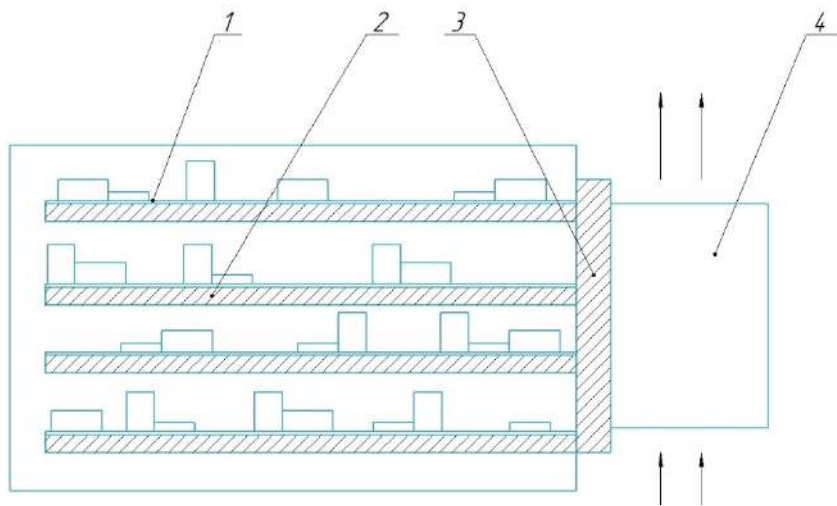


Рис. 5. Кондуктивное охлаждение

Плата с радиоэлементами 1 плотно контактирует с металлическими шинами 2, которые играют роль проводников тепла. Тепловая энергия передается по этим шинам к коллектору 3, который охлаждается с помощью воздушного или жидкостного охлаждения 4 [9].

Сравнение

В табл. 1 приведен сравнительный анализ рассмотренных методов охлаждения [10].

Таблица 1

Сравнение разных методов

| Метод охлаждения |                                            | Максимальная мощность рассеиваемого теплового потока, кВт/м² | Тип используемого теплоносителя |
|------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Воздушный        | Естественный                               | 0,2                                                          | Воздух                          |
|                  | Принудительный                             | 2–3                                                          | Воздух                          |
| Жидкостный       | Термосифонный                              | 1–10                                                         | Жидкость                        |
|                  | С принудительной циркуляцией теплоносителя | До 500                                                       | Жидкость                        |
| Испарительный    | Жидкостная                                 | Свыше 500                                                    | Жидкость                        |
|                  | Газовая                                    | 100                                                          | Газ                             |
| Кондуктивный     |                                            | До 250                                                       | Твердое тело                    |

Заключение

Эффективное отведение тепла является критическим фактором для обеспечения долгой и надежной работы РЭС. Выбор наиболее подходящего метода охлаждения зависит от типа устройства, его мощности и условий эксплуатации.

Воздушный метод охлаждения является одним из самых простых и экономичных способов отвода тепла из электронных компонентов. Он не требует сложных систем или дорогостоящих материалов, а его универсальность позволяет использовать его в различных устройствах. Кроме того, воздушное охлаждение легко обслуживается и не требует большого количества энергии для работы.

Жидкостное охлаждение является более эффективным методом отвода тепла по сравнению с воздушным охлаждением. Оно обеспечивает более высокую теплоотдачу за счет использования жидкости с высокой теплопроводностью, которая циркулирует вокруг электронных компонентов. Однако жидкостное охлаждение может быть более дорогим и сложным в установке, так как требует использования специальных устройств.

Испарительное охлаждение является еще более эффективным методом, но требует особого внимания к проектированию и установке.

Кондуктивное охлаждение используется для передачи тепла из теплонагруженных частей РЭС, когда недопустимо нарушение герметичности конструкции.

Важно помнить, что эффективное охлаждение не только увеличивает срок службы устройства, но и обеспечивает более стабильную работу, что может привести к повышению производительности и уменьшению количества сбоев. Поэтому выбор правильного метода охлаждения является ключевым фактором в обеспечении надежности и качества работы электронного оборудования [11].

### Список литературы

1. Белова В. В. Моделирование надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата на этапе электрических испытаний // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 3. С. 31–40.
2. Алмаметов В. Б., Марченко В. В., Кузина А. В. [и др.]. Современные проблемы развития микроэлектроники // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. № 1. С. 17–19.
3. Атаев А. Ж. Влияние теплового режима на надежность и параметры полупроводниковых и интегральных схем приборов // Доклады БГУИР. 2016. № 8. С. 65–70.
4. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Методы расчета теплового режима приборов. М. : Радио и связь, 1990. 312 с.
5. Муратов А. В., Ципина Н. В. Способы обеспечения тепловых режимов РЭС. Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2007. 96 с.
6. Сравнительная характеристика разных систем охлаждения компьютера: жидкостная и воздушная // CyberЛенинка URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-harakteristika-raznyh-sistem-ohlazhdeniya-kompyutera-zhidkostnaya-i-vozdushnaya> (дата обращения: 08.01.2024).
7. Чернышев А. А., Иванов В. И., Аксенов А. И., Глушкова Д. Н. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники. М. : Энергия, 1980. 216 с.
8. Завалишин П. И. О тепловых режимах РЭА. Вопросы радиоэлектроники, сер. ТРТО, вып. 1. 1967.
9. Совершенствование системы терморегулирования космических аппаратов // CyberЛенинка. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-sistemy-termoregulirovaniya-kosmicheskikh-apparatov> (дата обращения: 08.01.2024).
10. Горячев Н. В. Тепловая модель сменного блока исследуемого объекта // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 263.
11. Rybakov I. M., Goryachev N. V., Kochegarov I. I. [et al.] Application of the model of the printed circuit board with regard to the topology of external conductive layers for calculation of the thermal conditions of the printed circuit board // Journal of Physics: Conference Series (Tomsk, 21–26 September 2016). Bristol : IOPscience, 2017. P. 012130. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012130

### References

1. Belova V.V. Modeling the reliability of the system for ensuring the thermal regime of a spacecraft at the stage of electrical tests. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(3):31–40. (In Russ.)
2. Almametov V.B., Marchenko V.V., Kuzina A.V. et al. Modern problems of microelectronics development. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;(1):17–19. (In Russ.)
3. Ataev A.Zh. The influence of the thermal regime on the reliability and parameters of semiconductor and integrated circuits of devices. *Doklady BGUIR = Reports of BGUIR*. 2016;(8):65–70. (In Russ.)
4. Dul'nev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. *Metody rascheta teplovogo rezhima priborov = Methods of calculating the thermal regime of devices*. Moscow: Radio i svyaz', 1990:312. (In Russ.)
5. Muratov A.V., Tsipina N.V. *Sposoby obespecheniya teplovykh rezhimov RES = Methods of ensuring thermal regimes of thermal power plants*. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2007:96. (In Russ.)
6. Comparative characteristics of different computer cooling systems: liquid and air. *CyberLeninka*. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-harakteristika-raznyh-sistem-ohlazhdeniya-kompyutera-zhidkostnaya-i-vozdushnaya> (accessed 08.01.2024).
7. Chernyshev A.A., Ivanov V.I., Aksenov A.I., Glushkova D.N. *Obespechenie teplovykh rezhimov izdeliy elektronnoy tekhniki = Provision of thermal modes of electronic equipment products*. Moscow: Energiya, 1980:216. (In Russ.)
8. Zavalishin P.I. *O teplovykh rezhimakh REA. Voprosy radioelektroniki, ser. TRTO, vyp. 1 = On thermal regimes of REA. Radio Electronics issues, ser. TRTO, issue 1*. 1967. (In Russ.)
9. Improvement of the spacecraft temperature control system. *CyberLeninka*. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-sistemy-termoregulirovaniya-kosmicheskikh-apparatov> (accessed 08.01.2024).
10. Goryachev N.V. Thermal model of a replaceable unit of the object under study. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;1:263. (In Russ.)

11. Rybakov I.M., Goryachev N.V., Kochegarov I.I. et al. Application of the model of the printed circuit board with regard to the topology of external conductive layers for calculation of the thermal conditions of the printed circuit board. *Journal of Physics: Conference Series (Tomsk, 21–26 September 2016)*. Bristol: IOPscience, 2017:012130. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012130

### Информация об авторах / Information about the authors

**Бакытгуль Сагимжановна Бейсембаева**

старший преподаватель  
кафедры авиационной техники и технологий,  
Академия гражданской авиации  
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)  
E-mail: b.beisembayeva@agakaz.kz

**Виктор Дмитриевич Ежижанский**

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

**Александр Евгеньевич Яркин**

магистрант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: s.chicony@mail.ru

**Егор Андреевич Асеев**

магистрант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ra4for@yandex.ru

**Никита Сергеевич Реута**

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

**Bakytgul S. Beisembaeva**

Senior lecturer of the sub-department  
of aviation engineering and technology,  
Academy of Civil Aviation  
(44 Akhmetov street, Almaty, Kazakhstan)

**Viktor D. Ezhizhanskiy**

Master degree student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Aleksandr E. Yarkin**

Master degree student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Egor A. Aseev**

Master degree student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Nikita S. Reuta**

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 11.09.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 21.09.2024**

**Принята к публикации/Accepted 10.10.2024**

## АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСОВЫХ ВОЛН, ФОРМИРУЕМЫХ ГИДРОМАНЖЕТОЙ В ПРОЦЕССЕ ДЕКОМПРЕССИИ

М. С. Геращенко<sup>1</sup>, А. Д. Семенов<sup>2</sup>, С. И. Геращенко<sup>3</sup>, Н. В. Горячев<sup>4</sup>, И. М. Рыбаков<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> cts.com@yandex.ru, <sup>2</sup> sad-50@mail.ru, <sup>3</sup> mki\_doc@pnzgu.ru, <sup>4</sup> ra4foc@yandex.ru, <sup>5</sup> rybakov\_im@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Достоверность передачи давления от стенки артерии к гидроманжете в процессе декомпрессии существенно зависит от значений амплитудно-частотных характеристик пульсовых волн. Низкочастотные полосовые фильтры удаляют вместе с шумом часть полезного высокочастотного сигнала. Это приводит к погрешностям при определении передаточной функции системы «артерия – ткани – гидроманжета», устанавливаемых в процессе идентификации. Статья посвящена определению амплитудно-частотных характеристик пульсовых волн, формируемых гидроманжетой в процессе декомпрессии. Установлено, что высокая чувствительность гидроманжетного тонометра позволяет обнаруживать и выделять высокочастотные спектральные характеристики в сигналах датчика давления гидроманжеты. *Материалы и методы.* Процесс передачи давления, формируемого пульсовой волной в артерии, к датчику давления рассмотрен как процесс распространения упругих возмущений в волновом канале, включающем в себя стенки плечевой артерии, костно-мышечные ткани плеча, манжету и датчик давления. Для доказательств наличия высокочастотной составляющей в сигналах датчика давления использована процедура сингулярного разложения. *Результаты и выводы.* Сравнение воздушной и жидкостной рабочей среды показало, что коэффициент передачи в рабочем диапазоне частот примерно в 17 раз больше коэффициента передачи воздушной среды, а коэффициент фазовых искажений – в четыре раза меньше. Высокочастотный спектр сигнала лежит в пределах от 100 до 400 Гц.

**Ключевые слова:** артерия, пульсовая волна, гидроманжета, сингулярное разложение

**Для цитирования:** Геращенко М. С., Семенов А. Д., Геращенко С. И., Горячев Н. В., Рыбаков И. М. Амплитудно-частотные характеристики пульсовых волн, формируемых гидроманжетой в процессе декомпрессии // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 103–110. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-11

## AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF PULSE WAVES FORMED BY A HYDROMUCHER DURING DECOMPRESSION

M.S. Gerashchenko<sup>1</sup>, A.D. Semenov<sup>2</sup>, S.I. Gerashchenko<sup>3</sup>, N.V. Goryachev<sup>4</sup>, I.M. Rybakov<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> cts.com@yandex.ru, <sup>2</sup> sad-50@mail.ru, <sup>3</sup> mki\_doc@pnzgu.ru, <sup>4</sup> ra4foc@yandex.ru, <sup>5</sup> rybakov\_im@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Relevance and objectives. The reliability of pressure transmission from the artery wall to the hydrocuff during decompression significantly depends on the values of the amplitude-frequency characteristics of the pulse waves. Low-frequency bandpass filters remove part of the useful high-frequency signal along with noise. This leads to errors in determining the transfer function of the artery-tissue-hydrocuff system, established in the identification process. The article is devoted to determining the amplitude-frequency characteristics of pulse waves generated by the hydrocuff during decompression. It has been established that the high sensitivity of the hydrocuff tonometer allows detecting and highlighting high-frequency spectral characteristics in the signals of the hydrocuff pressure sensor. *Materials and methods.* The process of transmitting the pressure generated by the pulse wave in the artery to the pressure sensor is considered as a process of propagation of elastic disturbances in the wave channel, which includes the walls of the brachial artery, the musculoskeletal tissues of the shoulder, the cuff, the connecting tube and the pressure sensor. To prove the presence of a high-frequency component in the pressure sensor signals, the singular value decomposition procedure was used. *Results and conclusions.* Comparison of the air and liquid working environment showed that the transmission coefficient of the water channel, in the working frequency range, is approximately 17 times greater than the transmission coefficient of the air channel, and the phase distortion coefficient is four times smaller. The high-frequency spectrum of the signal lies within the range from 100 to 400 Hz.

**Keywords:** artery, pulse wave, hydrocuff, singular value decomposition

**For citation:** Gerashchenko M.S., Semenov A.D., Gerashchenko S.I., Goryachev N.V., Rybakov I.M. Amplitude-frequency characteristics of pulse waves formed by a hydromanometer during decompression. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):103–110. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-11

### Введение

Множественные фундаментальные исследования процесса передачи давления крови в артерии к воздушной манжете не решают задачу установления соответствия между давлением воздуха в манжете и давлением крови в артерии. Метод Короткова основан на утверждении равенства давления в артерии с давлением манжеты в момент окончания окклюзии артерии. Момент окончания окклюзии фиксируется по наличию тонов, вызванных появлением кровотока, что соответствует значению САД. Механическое сдавливание артерии прекращается при равенстве давления манжеты и ДАД, что фиксируется в момент исчезновения тонов Короткова. Ключевую роль в процессе оценки значений САД и ДАД по методу Короткова играют демпфирующие свойства тканей и ширина манжеты. В целом влияние демпфирующих свойств тканей приводит к завышению значений САД и ДАД. Частичное снижение завышения показаний можно достичь за счет изменения рабочей части ширины манжеты, т.е. индивидуального подбора манжеты для групп населения с однотипными анатомическими особенностями строения предплечья.

В осцилляторных методах изменения объема воздуха в манжете, при прохождении пульсовой волны, вызывают колебания давления в виде осцилляций. Механизм их формирования теоретически изучен достаточно полно, что позволило разработать различные методы оценки гемодинамических параметров [1–4]. Несмотря на устоявшиеся механизмы и широкое применение воздушной манжеты, формируемые осцилляции характеризуются низкой воспроизводимостью и наличием нелинейных искажений контура пульсовой волны. На процесс передачи давления от артерии к манжете существенное влияние оказывают массовые, упругие, эластичные свойства артерии и тканей, задействованных в передаче энергии пульсовой волны. Перечисленные параметры характеризуют анатомические особенности строения конечностей в местах наложения окклюзионной манжеты (предплечье, запястье, пальцы, лодыжка), что также требует индивидуального подбора тонометра.

Решение проблемы учета индивидуальных анатомических особенностей связано с идентификацией передаточной функции и коррекцией индивидуальных значений артериального давления [5]. Это позволяет расширить возможности оперативного мониторинга состояния ССС и осуществлять достоверную оценку изменения гемодинамических параметров, что способствует раннему выявлению АГ.

Известной проблемой теоретического исследования систем взаимодействия вязкоупругих тел является обоснование возможности получения адекватного решения в рамках математической модели взаимодействия, построенной на основе интегрального соотношения между компонентами тензоров напряжения и деформации [6, 7]. Для их оценки требуются модели, адекватно описывающие процесс влияния демпфирующего эффекта тканей, с реализацией нейросетевых технологий [8, 9].

Существуют различные направления исследований, связанных с повышением адекватности математических моделей, получаемых в процессе идентификации. В настоящей статье предлагается идентифицировать модели с учетом высокочастотной составляющей фазовых характеристик формируемых гидроманжетой пульсовых волн.

Цель исследования заключается в установлении характеристик высокочастотной составляющей в сигналах, снимаемых с датчика давления гидроманжеты, пригодных для использования в процедурах идентификации.

### Материалы и методы

В статье рассматривается переход использования в качестве рабочего тела манжеты от воздуха к жидкости и представления частотных характеристик для идентификации передаточной функции гидроманжетной технологии формирования осцилляций [10]. Гидроманжетная технология формирования осцилляций основана на создании избыточного давления в манжете за счет нагнетания в нее жидкости. Применение режима регулирования давления жидкости в манжете позволяет реализовать линейное изменение давления при компрессии и декомпрессии. Это делает возможным использование значения давления, задаваемого регулятором, в качестве входного параметра нелинейной системы артерия-ткань-гидроманжета. На рис. 1 показан график сигнала, снимаемого с датчика давления плечевой гидроманжеты в режиме линейного снижения давления.

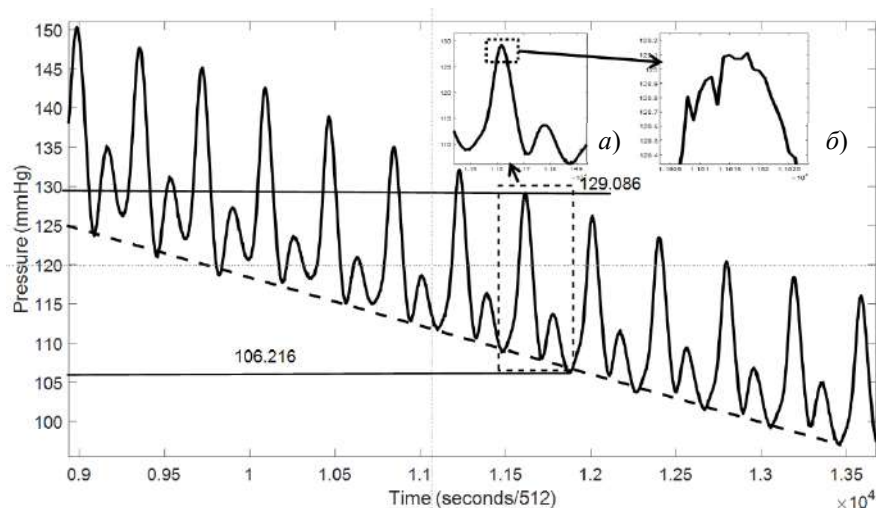


Рис. 1. График сигнала, снимаемого с датчика давления плечевой гидроманжеты в режиме линейного снижения давления

Значения давления манжеты оцифрованы с частотой 512 Гц. На графике для удобства восприятия представлен диапазон изменения давления 125...95 mmHg, обозначенный штриховой линией. Начала формирования осцилляций практически совпадают со значениями регулируемого давления. Наблюдаются незначительные отклонения в регулировке, не превышающие 1,5 mmHg. За счет систолической и диастолической составляющих давление в камере манжеты увеличивается на величину осцилляций. На выделенном пунктиром участке рис. 1,а амплитуда осцилляций составила 22,87 mmHg. Контур осцилляций содержит незначительные шумы с амплитудой, не превышающей 0,1 mmHg. В качестве примера на рис. 1,б показан увеличенный контур систолической составляющей выделенной осцилляции. Осцилляции, сформированные по гидроманжетной технологии, уникальны. Их амплитуда составляет 40...60 % пульсового давления. Контур осцилляций качественно передает динамику пульсовой волны плечевой артерии. Гидроманжетная методика относится к неинвазивным методам. Она проста в реализации и является эффективным способом регистрации пульсовой волны (ПВ) на периферических участках тела.

На рис. 2 приведены экспериментально зарегистрированные импульсы высокочастотного сигнала, выделенного из ПВ.

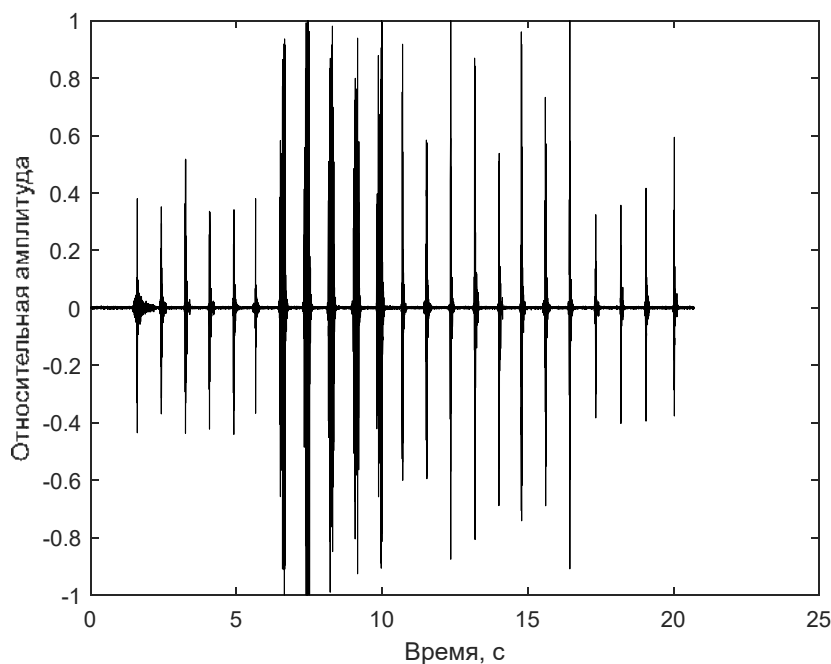


Рис. 2. Экспериментально зарегистрированные импульсы высокочастотного сигнала, выделенного из ПВ

На рис. 3 представлены значения среднеквадратических амплитуд высокочастотного сигнала. Их мощность максимальна при максимальной амплитуде осцилляций.

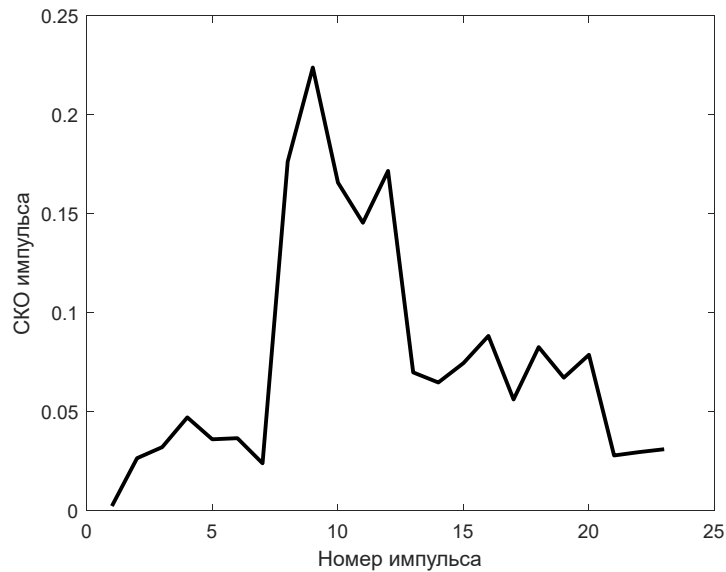


Рис. 3. Значения среднеквадратических амплитуд ВЧ сигнала

Частотный диапазон импульсов лежит в пределах от 100 до 400 Гц, что значительно выше частотного диапазона пульсовой волны.

На рис. 4 приведены спектрограммы низкочастотной (*а*) и высокочастотной (*б*) составляющих.

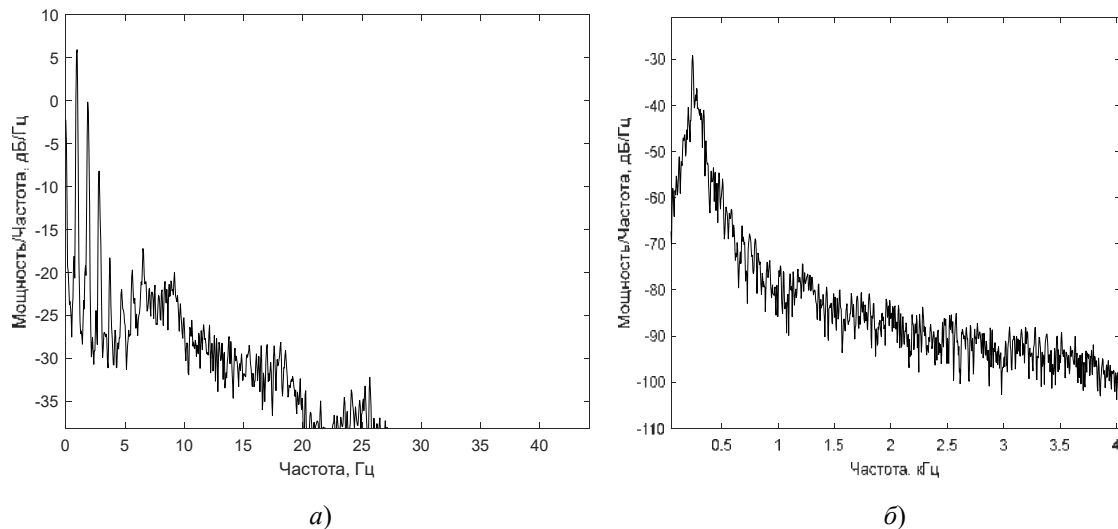


Рис. 4. Спектрограммы составляющих:  
а – спектрограмма НЧ; б – спектрограмма ВЧ

Данные спектрограммы свидетельствуют о возможности выделения высокочастотной составляющей из сигналов пульсовых волн, снимаемых с датчика давления гидроманжеты.

Для дополнительного исследования спектральных характеристик ПВ проведено сингулярное разложение сигнала. В результате разложения получено 373 собственных вектора, сгруппированных в три группы: низкочастотные векторы с номерами (1–5); среднечастотные векторы с номерами (6–127) и высокочастотные векторы с номерами (128–373). На рис. 5–7 показаны суммы этих векторов и их спектры.

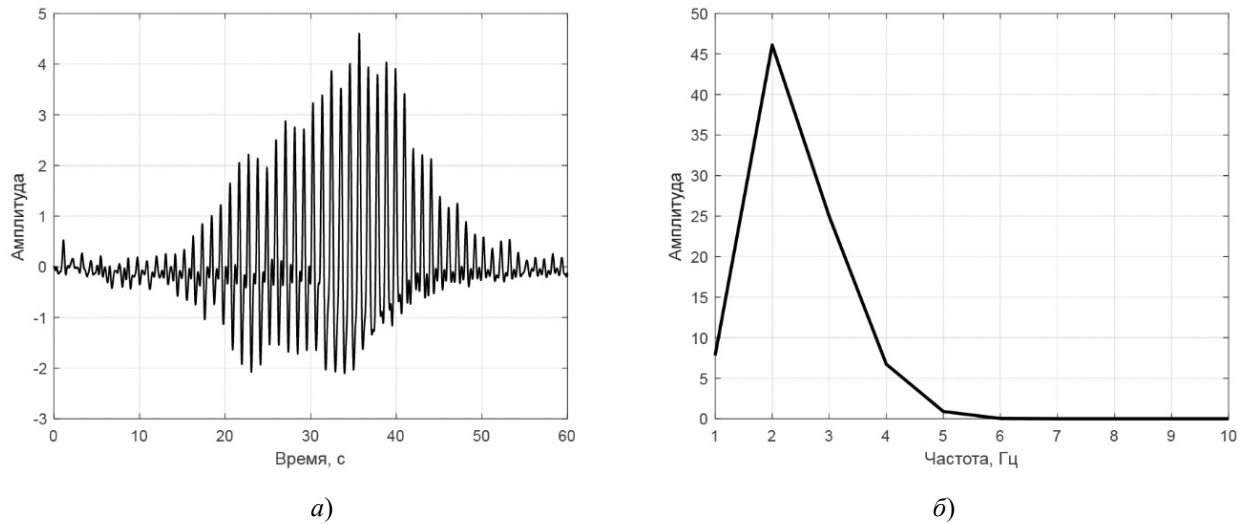


Рис. 5. Низкочастотная составляющая собственных векторов:  
 $a$  – сумма векторов;  $b$  – спектр суммы

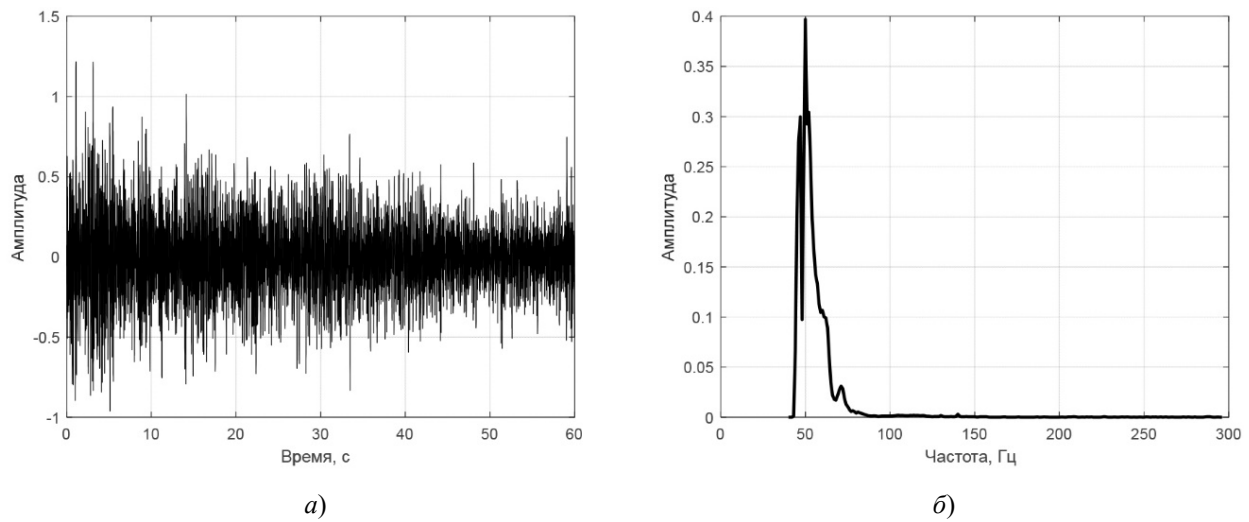


Рис. 6. Среднечастотная составляющая собственных векторов:  
 $a$  – сумма векторов;  $b$  – спектр суммы

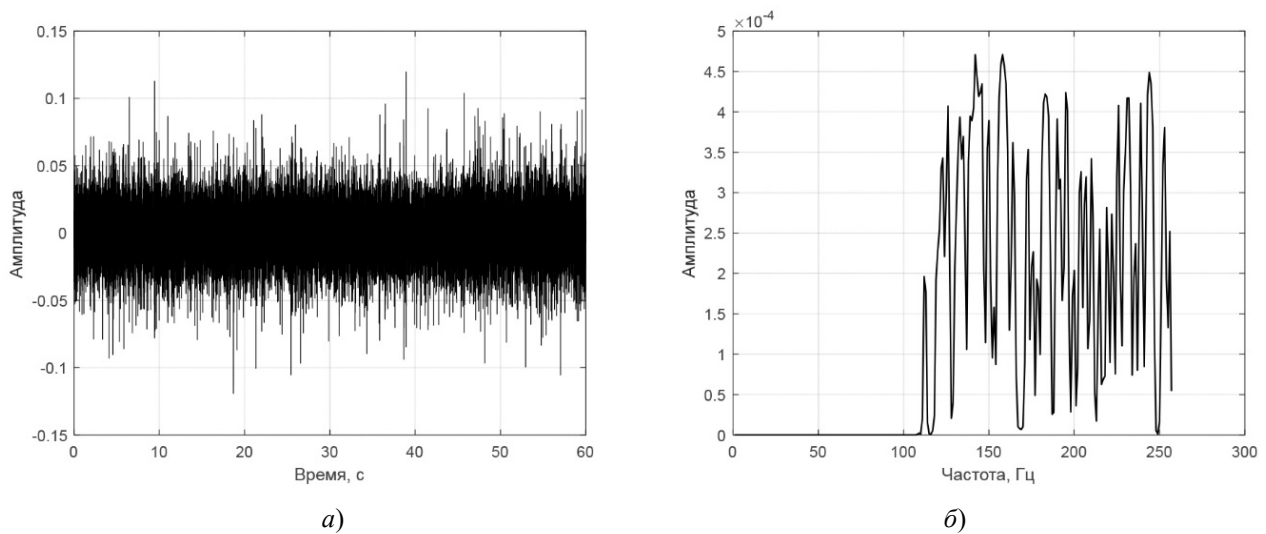


Рис. 7. Высокочастотная составляющая собственных векторов:  
 $a$  – сумма векторов;  $b$  – спектр суммы

Анализ спектров собственных векторов показывает, что низкочастотная составляющая имеет максимум на частоте сердечных сокращений, среднечастотная составляющая имеет максимум на частоте питающей сети и высокочастотная составляющая имеет спектр, частотная область которого совпадает с частотной областью тонов Короткова.

Для сравнения передаточных характеристик воздушной и гидроманжетной систем в частотной области определены коэффициенты затухания сигнала, приведенные на рис. 8.

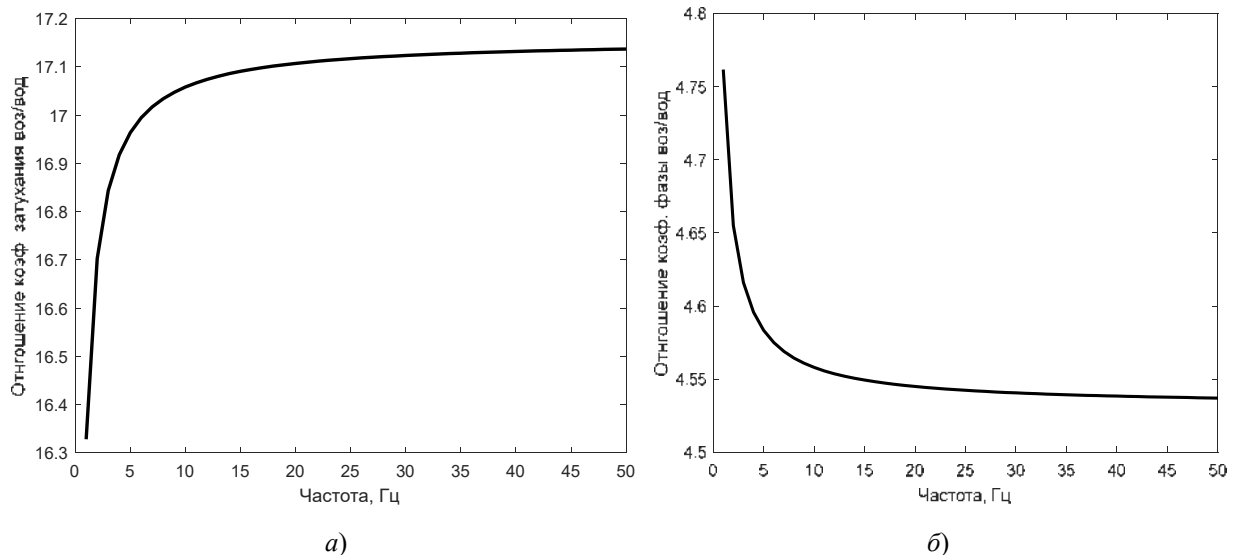


Рис. 8. Частотная зависимость коэффициентов затухания воздушной и гидроманжетной систем:  
 а – отношение коэффициента затухания; б – отношение коэффициента фазы

Установлено, что применение гидроманжетной системы позволяет снизить коэффициент затухания сигнала по амплитуде в 17 раз и уменьшить фазовые искажения в 4,5 раза по сравнению с воздушной, что в целом создает благоприятные условия для процедур идентификации.

### Результаты и их обсуждение

Гидроманжетная система позволяет качественно выделять высокочастотную составляющую из сигнала пульсовых волн, снимаемых с датчика давления. Ее частотный диапазон лежит в пределах 100...400 Гц. Мощность ВЧ сигнала достаточна для ее использования в процедурах идентификации. Процедуры идентификации индивидуальных передаточных функций прямой и отраженной волны в системе артерия-ткани-гидроманжета для высокочастотного спектра осуществлены на основе сигналов, снимаемых с плечевой окклюзионной гидроманжеты в процессе декомпрессии. Это создает условия повышения степени адекватности математических моделей, представленных в виде передаточных функций на основе процедур идентификации.

Учет индивидуальных анатомических особенности пациентов позволяет корректировать значения артериального давления в тонометрах аускультативного и осциляторного типа. Поэтому процедуры идентификации индивидуальных передаточных функций прямой и отраженной волны в системе артерия-ткани-гидроманжета, для высокочастотного спектра осуществлены на основе сигналов, снимаемых с плечевой окклюзионной гидроманжеты в процессе декомпрессии.

Направление дальнейших исследований связано с реализацией методики учета анатомических особенностей пациентов и коррекции значений артериального давления, что позволит снизить инструментальную погрешность тонометров.

### Список литературы

1. Геращенко М. С., Маркулева М. В., Геращенко С. И. [и др.]. Нелинейная SVD-фильтрация в гидроманжетных системах для оценки гемодинамических параметров // Физический журнал: серия конференций. 2020. Т. 1515. doi: 10.1088/1742-6596/1515/5/052041
2. Gerashchenko M. S., Gerashchenko S. M., Gerashchenko S. I., Yankina N. N. Application of the hydrocuff technology for blood pressure evaluation // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11, № 4. P. 2271–2274.

3. Писарев М. А., Чувькин Б. В., Геращенко С. И. [и др.]. К вопросу о реализации неинвазивных методов измерения параметров пульсовой волны автономными портативными приборами // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 1. С. 89–94.
4. Данилина О. С., Мнацаканян А. А., Геращенко С. И., Геращенко С. М. Комплекс суточного мониторинга гемодинамических показателей сердечно-сосудистой системы человека // Вестник Пензенского государственного университета. 2015. № 3. С. 114–117.
5. Gerashchenko M. S., Fateev A. G., Markuleva M. V. [et al.]. Biometric identification and authentication based on a new method of a pulse wave contour forming // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1679. P. 0220171.
6. 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.
7. Gerashchenko M. S., Polosin V. G., Gerashchenko S. I., Markuleva M. V. A probabilistic method for correcting pulse wave artifacts // Biomedical Engineering. 2024. № 57 (6). P. 410–413.
8. Кривоногов Л. Ю., Геращенко М. С., Геращенко С. И. [и др.]. Нейросетевой модуль контроля качества зарегистрированных сигналов для систем амбулаторного персонального телемониторинга ЭКГ // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 116–123.
9. Markuleva M., Gerashchenko M., Gerashchenko S. [et al.]. The hemodynamic parameters values prediction on the non-invasive hydrocuff technology basis with a neural network applying // Sensors. 2022. Vol. 22, № 11. P. 4229.
10. Пат. RU 2652070 C1. Электронный тонометр / Геращенко С. И., Геращенко М. С. № 2017117129 ; заявл. 16.05.2017, опубл. 24.04.2018.

### References

1. Gerashchenko M.S., Markuleva M.V., Gerashchenko S.I. et al. Nonlinear SVD filtration in hydromanjet systems for hemodynamic parameter estimation. *Fizicheskiy zhurnal: seriya konferentsiy = Physical Journal: conference series*. 2020;1515. (In Russ.). doi: 10.1088/1742-6596/1515/5/052041
2. Gerashchenko M.S., Gerashchenko S.M., Gerashchenko S.I., Yankina N.N. Application of the hydrocuff technology for blood pressure evaluation. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016;11(4):2271–2274.
3. Pisarev M.A., Chuvykin B.V., Gerashchenko S.I. et al. On the implementation of non-invasive methods for measuring pulse wave parameters with autonomous portable devices. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2016;(1):89–94. (In Russ.)
4. Danilina O.S., Mnatsakanyan A.A., Gerashchenko S.I., Gerashchenko S.M. Complex of daily monitoring of hemodynamic parameters of the human cardiovascular system. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Penza State University*. 2015;(3):114–117. (In Russ.)
5. Gerashchenko M.S., Fateev A.G., Markuleva M.V. et al. Biometric identification and authentication based on a new method of a pulse wave contour forming. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679:0220171.
6. Polosin V.G., Gerashchenko S.I., Gerashchenko M.S., Bezborodova O.E. Elastic shell model in the artery–cuff system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):62–73. (In Russ.)
7. Gerashchenko M.S., Polosin V.G., Gerashchenko S.I., Markuleva M.V. A probabilistic method for correcting pulse wave artifacts. *Biomedical Engineering*. 2024;(57):410–413.
8. Krivonogov L.Yu., Gerashchenko M.S., Gerashchenko S.I. et al. Neural network module for quality control of recorded signals for outpatient personal ECG telemonitoring systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):116–123. (In Russ.)
9. Markuleva M., Gerashchenko M., Gerashchenko S. et al. The hemodynamic parameters values prediction on the non-invasive hydrocuff technology basis with a neural network applying. *Sensors*. 2022;22(11):4229.
10. Patent RU 2652070 C1. *Elektronnyy tonometr = Electronic tonometer*. Gerashchenko S.I., Gerashchenko M.S. № 2017117129; appl. 16.05.2017, publ. 24.04.2018. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Михаил Сергеевич Геращенко

кандидат технических наук, доцент кафедры  
медицинской кибернетики и информатики,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: cts.com@yandex.ru

#### Mikhail S. Gerashchenko

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

**Анатолий Дмитриевич Семенов**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры информационно-измерительной  
техники и метрологии,  
заведующий лабораторией цифровых  
информационно-управляющих систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: sad-50@mail.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: mki\_doc@pnzgu.ru

**Николай Владимирович Горячев**

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

**Илья Михайлович Рыбаков**

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

**Anatoly D. Semenov**

Doctor of technical sciences, associate professor,  
professor of the sub-department of information  
and measuring technology and metrology,  
head of the laboratory of digital information  
and control systems,  
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 informatics,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Nikolay V. Goryachev**

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

**Ilya M. Rybakov**

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 21.09.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 14.10.2024**

**Принята к публикации/Accepted 10.10.2024**

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

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

УДК 681.518.5

doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-12

### К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА

В. Н. Клячкин<sup>1</sup>, В. О. Ташниченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

<sup>2</sup> Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия

<sup>1</sup> v\_kl@mail.ru, <sup>2</sup> victoria.tashnichenko@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Статистический контроль процессов предназначен для выявления специальных (неслучайных) причин нарушения с целью предотвращения снижения качества выпускаемой продукции. Решение оптимизационных задач для различных ситуаций и различных типов контрольных карт даст в общем случае совершенно разные значения объема мгновенной выборки, частоты отбора выборок и положения контрольных границ. Какие значения принять? Возникает актуальная задача многокритериальной оптимизации. *Материалы и методы.* Для контроля некоррелированных показателей используются стандартные карты средних значений и стандартных отклонений или размахов. Если же корреляции между показателями значимы, применяют специальные многомерные методы, основанные на алгоритме Хотеллинга для контроля среднего уровня процесса и алгоритме обобщенной дисперсии для контроля рассеяния. Задача оптимизации параметров контроля была решена А. Дунканом для карт Шухарта. Позднее были рассмотрены вопросы оптимизации параметров алгоритмов Хотеллинга и обобщенной дисперсии. *Результаты и выводы.* Рассмотрен пример анализа стабильности функционирования блока усилителя мощности. Решение оптимизационной задачи позволило найти оптимальный объем выборки, интервал между выборками, вероятность ложной тревоги и среднее время пребывания процесса в нестабильном состоянии. Сформулирована новая научная задача оптимизации параметров многомерного статистического контроля процесса. Найдено решение для конкретного примера. В общем случае, когда необходимо учесть возможность различных типов нарушений для разных показателей, решается задача многокритериальной оптимизации.

**Ключевые слова:** алгоритм Хотеллинга, обобщенная дисперсия, скорость обнаружения нарушения, стоимость контроля

**Для цитирования:** Клячкин В. Н., Ташниченко В. О. К вопросу об оптимизации параметров многомерного статистического контроля процесса // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 111–118. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-12

## ON THE ISSUE OF OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF MULTIVARIATE STATISTICAL PROCESS CONTROL

V.N. Klyachkin<sup>1</sup>, V.O. Tashnichenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

<sup>2</sup> Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

<sup>1</sup> v\_kl@mail.ru, <sup>2</sup> victoria.tashnichenko@gmail.com

**Abstract.** *Background.* Statistical control of processes is designed to identify special (non-random) causes of violation in order to prevent a decrease in the quality of products. Solving optimization problems for different situations and different types of control charts will generally give completely different values for the instantaneous sample size, sampling rate, and control boundary positions. What values should be taken? An urgent problem of multi-criteria optimization arises. *Materials and methods.* For uncorrelated measures, standard maps of averages and standard deviations or ranges are used. If the correlations between the indicators are significant, special multivariate methods are used, based on the Hotelling algorithm to control the average level of the process and the generalized dispersion algorithm to control scattering. The problem of optimizing control parameters was solved by A. Duncan for Shewhart maps. Later, the problems of optimizing the parameters of the Hotelling algorithms and generalized variance were considered. *Results and conclusions.* An example of analyzing the stability of the power amplifier unit operation is considered. The solution of the optimization problem made it possible to find the optimal sample size, the interval between samples, the probability of a false alarm and the average time of the process being in an unstable state. A new scientific problem of optimizing the parameters of multivariate statistical process control is formulated. A solution for a specific example is found. In general, when it is necessary to take into account the possibility of different types of violations for different indicators, the problem of multi-criteria optimization is solved.

**Keywords:** Hotelling algorithm, generalized variance, violation detection rate, cost of control

**For citation:** Klyachkin V.N., Tashnichenko V.O. On the issue of optimization of the parameters of multivariate statistical process control. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):111–118. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-12

### Введение

Вариации в процессах обусловлены причинами двух типов – общими (связанными с конкретной производственной системой) и специальными (связанными с нарушением условий процесса: например, износом или ослаблением крепления инструмента, изменением температуры смазочно-охлаждающей жидкости и т.п.) [1]. Статистический контроль процессов предназначен для выявления этих специальных причин с целью предотвращения нарушения качества выпускаемой продукции: процесс считается нарушенным, если контролируемый показатель вышел за пределы контрольных границ, соответствующих доверительному интервалу для исследуемого параметра; при этом этот показатель еще находится в пределах допуска (неслучайная причина нарушения обнаружена чисто статистическими методами), т.е. имеется возможность своевременно предотвратить выявленное нарушение.

Контроль стабильности процесса проводится по двум критериям: по среднему уровню и рассеянию. При этом для некоррелированных показателей (корреляции между ними незначимы) используются контрольные карты для средних значений и стандартных отклонений или размахов<sup>1</sup>.

Если же контролируемые показатели коррелированы (значимость корреляций проверяется по критерию Стьюдента), целесообразно использовать многомерные методы, основанные на алгоритме Хотеллинга для контроля среднего уровня процесса и алгоритме обобщенной дисперсии (определителе ковариационной матрицы) для анализа многомерного рассеяния [2, 3].

Через определенные промежутки времени (как правило, равные) берутся мгновенные выборки обычно объемом по 3–10 наблюдений и вычисляются значения соответствующих статистик. Эти значения откладываются на карте, где также показывается положение центральной линии и контрольных границ – границ доверительного интервала. Выход точки за границу или особое положение точек на карте (например, тренд) свидетельствуют о статистическом нарушении процесса.

С точки зрения статистики при этом проводится проверка статистических гипотез о соответствии среднего уровня процесса и его рассеяния заданным значениям.

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты. Ч. 2. Контрольные карты Шу-харта.

Основными параметрами контроля являются объем мгновенной выборки, частота отбора выборок и положение контрольных границ. Эти параметры чаще всего принимаются на основании некоторого предшествующего опыта: например, для определения положения контрольных границ на карте средних значений  $\bar{Y}$ . Шухарт предложил использовать известное правило трех сигм, соответствующее при нормальном распределении вероятности ложной тревоги 0,0027; это значение вошло в международные стандарты и благополучно используется и в настоящее время.

Однако еще в 60-х гг. XX-го в. американский специалист А. Дункан поставил вопрос об оптимизации этих параметров: очевидно, что их выбор влияет как на скорость обнаружения нарушения, так и на стоимость контроля [4]. Он решил эту задачу для карт Шухарта. Позднее были рассмотрены вопросы оптимизации карт Хотеллинга [5–9] и обобщенной дисперсии [10, 11].

Для конкретного процесса обычно некоторое подмножество показателей анализируется с помощью карт Шухарта, а оставшиеся – многомерными картами. При этом возможны разные типы нарушений процесса, например, скачкообразное изменение среднего уровня по одному показателю и постепенное увеличение рассеяния по другому.

Решение оптимизационных задач для различных ситуаций и различных типов карт даст в общем случае совершенно разные значения объема мгновенной выборки, частоты отбора выборок и положения контрольных границ. Какие значения принять? Возникает задача многокритериальной оптимизации.

### Материалы и методы

В качестве примера рассмотрим процесс контроля стабильности функционирования блока усилителя мощности в зависимости от двух коррелированных показателей электровакуумных приборов, используемых в системе:  $x_1$  – ток катода,  $x_2$  – выходная мощность. Контроль проводился каждые два часа ( $h = 2$ ), объем выборки – три наблюдения ( $n = 3$ ). Всего взято 30 выборок.

Блок усилителя мощности в передающем устройстве радиолокационной станции обеспечивает эффективную работу средств воздушно-космической обороны и использует электровакуумные приборы (клистроны). Обеспечение стабильности параметров клистронов является необходимым требованием для нормального функционирования блока.

На рис. 1 показана корреляционная матрица: корреляция между показателями  $x_1$  и  $x_2$  значима. Также была проверена нормальность распределения как по каждому показателю, так и многомерная нормальность. На рис. 2 в качестве примера показана гистограмма для  $x_1$ : по критерию Лиллиефорса  $p$ -значение превышает 0,20, что свидетельствует о том, что гипотеза о нормальности распределения по этому показателю не противоречит опытным данным. Однако нормальность распределения по каждому показателю является необходимым, но не достаточным условием многомерной нормальности. Нормальность совместного распределения двух показателей  $x_1$  и  $x_2$  оценивалась по тесту Дорника – Хансена [12]: значение критерия оказалось равным  $DH = 8,12$ , а соответствующее  $p$ -значение  $p = 0,12$ , что подтверждает справедливость гипотезы о двумерной нормальности распределения.

| Корреляции (клистрон2)<br>Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,050$<br>N=90 (Построчное удаление ПД) |          |          |          |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Переменная                                                                                                     | Средние  | Ст.откл. | $x_1$    | $x_2$    |
| $x_1$                                                                                                          | 9,03293  | 0,319595 | 1,000000 | 0,581314 |
| $x_2$                                                                                                          | 30,00732 | 3,804032 | 0,581314 | 1,000000 |

Рис. 1. Корреляционная матрица

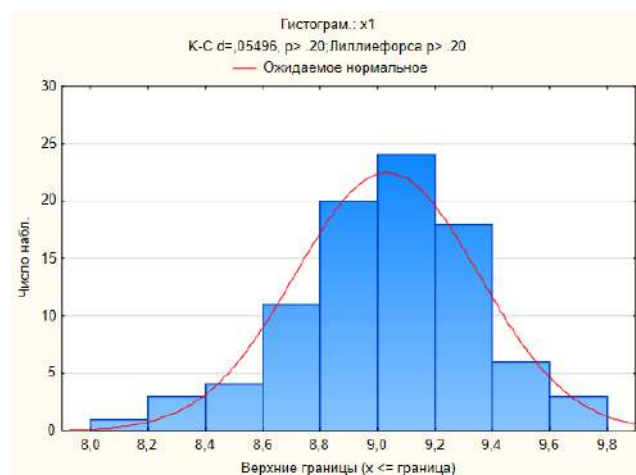


Рис. 2. Проверка нормальности по показателю  $x_1$

Многомерные карты по показателям  $x_1$ – $x_2$ , построенные в системе Statistica (использована локализованная версия 13.3) [13–15], показаны на рис. 3. Вероятность ложной тревоги принята на обеих картах  $\alpha = 0,005$  (как правило, при многомерном контроле применяется это значение).

Верхняя карта – это визуализация проверки гипотезы о равенстве вектора средних заданным значениям на основе теста Хотеллинга, нижняя – о равенстве обобщенной дисперсии (характеризующей многомерное рассеяние данных) заданному значению.

Соответствующие контрольные границы: на карте Хотеллинга – 11,411, на карте обобщенной дисперсии – 8,0948. Центральные линии карт – 1,3789 и 1,1975 соответственно. Заметим, что обе карты имеют только верхние контрольные границы. Все точки на обеих картах лежат ниже соответствующих контрольных границ, нарушений нет, процесс стабилен.

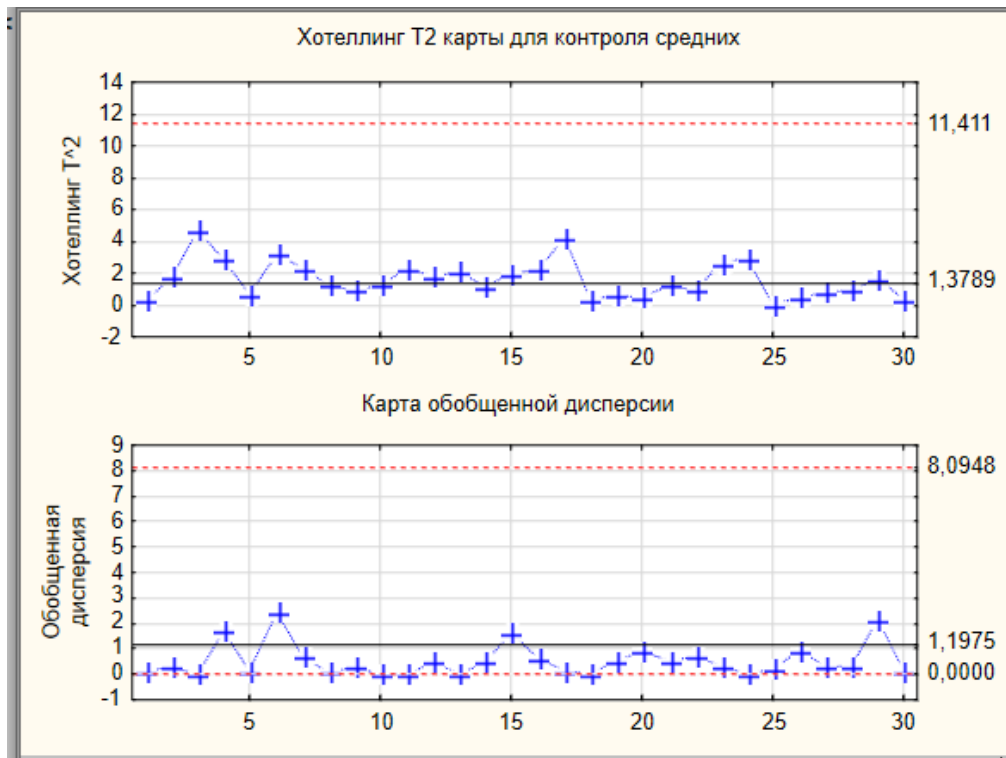


Рис. 3. Многомерные контрольные карты

Решение задачи оптимизации возможно с использованием двух подходов: по вероятностным или стоимостным критериям. Критерий вероятностного типа характеризует качество выявления нарушений процесса с помощью выбранной карты. Применение такого подхода минимизирует вероятности ошибок первого  $\alpha$  и второго рода  $\beta$  по сравнению с другими подходами и, следовательно, обеспечивает наибольшее среднее время нахождения процесса в стабильном состоянии. Недостатком подхода является то, что не представляется возможным оценить затраты на контроль и в целом – экономическую эффективность контроля.

При стоимостном подходе предполагается, что затраты на проведение контроля можно определенным образом оценить. Рассматриваются основные виды затрат:

- затраты на контроль – это возрастающая функция объема выборки  $n$  и убывающая функция промежутка времени  $h$  между выборками;
- затраты, связанные с приостановкой процесса на время принятия мер по корректировке процесса и являющиеся убывающей функцией интервала между выборками;
- затраты, связанные с воздействием необнаруженного нарушения процесса – возрастающая функция интервала между выборками.

Как показал А. Дункан [4], контрольные карты Шухарта, построенные в соответствии со стоимостным подходом, могут приводить к большому числу ложных сигналов о нарушении процесса или, наоборот, к пропуску нарушений. Очевидно, этот вывод справедлив и при многомерном контроле. Баланс между качеством обнаружения нарушений и затратами достигается при соблюдении как вероятностных, так и стоимостных критериев. Вероятностно-стоимостной подход объединяет оба

подхода: задача оптимизации сводится к минимизации функции затрат при выполнении некоторых статистических ограничений.

Например, для оптимизации параметров алгоритма обобщенной дисперсии необходимо по результатам предшествующих испытаний определить математическое ожидание пребывания процесса в стабильном режиме  $1/\lambda$  ( $\lambda$  – интенсивность нарушений) и допустимое увеличение обобщенной дисперсии  $d$  (рассматривается один из возможных вариантов нарушения процесса – скачкообразное увеличение рассеяния), вычислить по обучающей выборке величину целевой обобщенной дисперсии  $|\Sigma_0|$ , зная при этом среднее время обработки одного элемента выборки  $g$  и длительность периода поиска нарушения после его выявления  $D$ .

Минимизируется математическое ожидание времени  $T_0$  пребывания процесса в нестабильном состоянии [5–11]

$$M(T_0) = \frac{h}{1-\beta} - \frac{1-(1+\lambda h)e^{-\lambda h}}{\lambda(1-e^{-\lambda h})} + ng + D \rightarrow \min. \quad (1)$$

Здесь  $\beta$  – вероятность ошибки второго рода (пропуска нарушения), определяемая по формуле [11]

$$\beta = \Phi\left[\frac{u_{1-\alpha/2}}{d} - \frac{b_1(d-1)}{d\sqrt{b_2}}\right] - \Phi\left[-\frac{u_{1-\alpha/2}}{d} - \frac{b_1(d-1)}{d\sqrt{b_2}}\right],$$

где  $\Phi(\cdot)$  – функция стандартного нормального распределения;  $u_{1-\alpha/2}$  – квантиль нормального распределения порядка  $1-\alpha/2$  ( $\alpha$  – вероятность ошибки первого рода);  $b_1$  и  $b_2$  – параметры алгоритма обобщенной дисперсии, зависящие от объема выборки  $n$  и количества контролируемых показателей  $p$  [2, 3].

Также задаются ограничения на объем рациональной подгруппы

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max},$$

интервал между взятием выборок

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$$

и вероятность ложной тревоги

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max},$$

которые оцениваются специалистом по конкретному процессу.

Для оптимизации параметров контрольных карт перспективным представляется применение методов адаптивного статистического контроля. Адаптивный контроль предполагает применение моделей прогноза различной степени сложности и внесение регулярной корректировки в процесс при его отклонении от стандартного уровня.

В основе методов лежит применение карт с предупреждающей границей. В отличие от контрольной границы, которая делит область возможных состояний процесса на две зоны – нормального протекания процесса и нарушения, карта с предупреждающей границей делит эту область на три зоны: добавляется зона предупреждения об опасном состоянии.

С помощью таких карт определяется множество состояний разлаженного и налаженного процесса, правила перехода между двумя и более планами контроля (наборы параметров контрольных карт). Этот подход оказался особенно эффективным при оптимизации параметров алгоритма Хотеллинга [5–7].

Статистическим показателем, характеризующим чувствительность к обнаружению нарушений процесса, выступает среднее время обнаружения нарушений. Оценивать данную величину можно с помощью аппарата цепей Маркова [7].

### Результаты и обсуждение

В рассмотренном выше примере анализа стабильности функционирования блока усилителя мощности в зависимости от показателей электровакуумных приборов, используемых в блоке, по мнению специалистов, занимающихся эксплуатацией таких систем, наиболее опасным является скачкообразное увеличение рассеяния процесса. Принятие этого предположения существенно упрощает поставленную задачу.

Проверяется нулевая гипотеза о том, что рассеяние процесса, характеризуемое обобщенной дисперсией  $|\Sigma|$ , увеличилось по сравнению с целевым значением  $|\Sigma_0|$  в  $d$  раз, т.е. проверяемая гипотеза  $H_0: |\Sigma| = d|\Sigma_0|$ , при альтернативе  $H_1: |\Sigma| > d|\Sigma_0|$ .

При этом следует учесть, что для контроля всей совокупности параметров электровакуумных приборов используются как карты Шухарта (например, входная мощность приборов не коррелирована ни с одним из других показателей), так и другие наборы многомерных карт (например, для контроля напряжения и тока накала). Для каждого типа карт решение оптимизационной задачи даст различные значения объема выборок, интервалов между взятием выборок и вероятностей ложной тревоги.

Учитывая общий критерий обеспечения скорейшего обнаружения скачкообразного рассеяния процесса, в качестве допустимых можно принять минимальное из найденных значений интервала  $h$ , максимальное значение объема выборки  $n$  и минимальное значение вероятности ошибки первого рода  $\alpha$ .

Решение оптимизационной задачи (1) проводилось по специально разработанной программе на языке Python. Начало работы программы подразумевает последовательный ввод пользователем через интерфейс программы данных о количестве контролируемых показателей качества, характеристиках стоимостных и временных затрат на обнаружение нарушений, а также диапазоне допустимых значений оптимизируемых параметров.

Программа использует библиотеку с открытым исходным кодом *scipy* Python, предназначенным для научных и инженерных расчетов, из которой подключены модули *optimize* и *stats*. Модуль *optimize* обеспечивает нахождение как условного, так и безусловного экстремума функции.

В программе использован метод Broyden – Fletcher – Goldfarb – Shanno [11], названный по фамилиям разработчиков. Этот метод относится к итерационным квазиньютоновским методам численной оптимизации. Особенность метода в том, что он не предполагает вычисления частных производных второго порядка, так как нет необходимости в определении гессиана функции напрямую. Гессиан определяется приближенно, исходя из предыдущих итераций.

Полученный результат:

- оптимальный объем выборки  $n = 3$ ;
- интервал между выборками  $h = 1,4$  ч;
- вероятность ложной тревоги  $\alpha = 0,0014$ , при этом среднее время пребывания процесса в неустойчивом состоянии  $M(T_0) = 6,3$  ч.

При необходимости можно оценить и соответствующие затраты на контроль по формуле

$$M(C) = V_0 \frac{1}{\lambda} + V_1 M(T_0) - a_3 - \frac{a_3' e^{-\lambda h}}{1 - e^{-\lambda h}} - \frac{(a_1 + a_2 n)(M(T))}{h}, \quad (2)$$

где  $M(C)$  – математическое ожидание затрат; почасовые доходы при стабильном и неустойчивом состояниях процесса равны  $V_0$  и  $V_1$  соответственно; затраты на взятие выборки объема  $n$  и обработку результатов можно представить в форме:  $a_1 + a_2 n$ , где  $a_1$  и  $a_2$  – постоянная и переменная составляющие затрат соответственно; затраты на поиск нарушения процесса принимаются равными величине  $a_3$ , а затраты на исследование сигнала ложной тревоги – величине  $a_3'$ .

### Заключение

Сформулирована новая научная задача оптимизации параметров многомерного статистического контроля процесса. Подходы к ее решению проиллюстрированы на примере оптимизации параметров при контроле стабильности показателей электровакуумных приборов, обеспечивающих функционирование блока усилителя мощности радиолокационной станции. При этом предполагается, что наиболее опасным является скачкообразное увеличение рассеяния процесса.

В более общем случае, когда необходимо учесть возможность различных типов нарушений для разных показателей, решается задача многокритериальной оптимизации. При этом строится множество Парето, на основе которого может быть принято некоторое компромиссное решение.

### Список литературы

1. Адлер Ю., Шпер В. Практическое руководство по статическому управлению процессами. М. : Альпина Паблишер, 2019. 234 с.

2. Montgomery D. C. Introduction to statistical quality control. N.Y. : John Wiley and Sons, 2009. 754 p.
3. Клячкин В. Н., Крашенинников В. Р., Кувайскова Ю. Е. Прогнозирование и диагностика стабильности функционирования технических объектов : монография. М. : РУСАЙНС, 2020. 200 с.
4. Duncan A. J. The economic design of x-chart used to maintain current control of the process // Journal of the American Statistical Association. 1956. Vol. 51. P. 228–242.
5. Faraz A., Heuchenne C. Double-objective economic statistical design of the VP T2 control chart: Wald's identity approach // Journal of Statistical Computation and Simulation. 2014. Vol. 84. P. 2123–2137.
6. Bahirae E., Raissi S. Economic Design of Hotelling's Control Chart on the Presence of Fixed Sampling Rate and Exponentially Assignable Causes // Journal of Industrial Engineering International. 2014. Vol. 10. P. 229–238.
7. Зенцова Е. А. Сравнительный анализ подходов к оптимизации параметров контрольной карты Хотеллинга // Автоматизация процессов управления. 2017. № 1. С. 47–52.
8. Клячкин В. Н., Кравцов Ю. А. Диагностика состояния объекта по наличию неслучайных структур на карте Хотеллинга // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 5. С. 44–50.
9. Зенцова Е.А. Модель минимизации затрат для модифицированной карты Хотеллинга // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования : VII Всерос. школа-семинар аспирантов, студентов и молодых ученых (ИМАП-2015). УлГТУ, 2015. С. 138–143.
10. Клячкин В. Н., Барт А. Д. Оценка стабильности показателей качества при очистке питьевой воды // Экологические системы и приборы. 2017. № 8. С. 14–20.
11. Алексеева А. В. Оптимизация параметров алгоритма обобщенной дисперсии при многомерном статистическом контроле // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. (школа-семинар) молодых ученых. Тольятти : Тольяттинский государственный университет, 2022. С. 59–62.
12. Doornik, J. A., H. Hansen. An omnibus test for univariate and multivariate normality // Oxford Bulletin of Economics and Statistics. 2008. Vol. 70. P. 927–939.
13. Боровиков В. П. Популярное введение в современный анализ данных и машинное обучение на Statistica. М., 2018. 288 с.
14. Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Особенности диагностики технических систем с использованием мультиклассовой классификации // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 45–52.
15. Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Статистический контроль стабильности вибраций гидроагрегата с использованием метода главных компонент // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 41–48.

### References

1. Adler Yu., Shper V. *Prakticheskoe rukovodstvo po staticheskomu upravleniyu protsessami = Practical guide to static process management*. Moscow: Al'pina Publisher, 2019:234. (In Russ.)
2. Montgomery D.C. *Introduction to statistical quality control*. NewYork: John Wiley and Sons, 2009:754.
3. Klyachkin V.N., Krashennnikov V.R., Kuvayskova Yu.E. *Prognozirovanie i diagnostika stabil'nosti funktsionirovaniya tekhnicheskikh ob"ektov: monografiya = Forecasting and diagnostics of the stability of the functioning of technical facilities : monograph*. Moscow: RUSAYNS, 2020:200. (In Russ.)
4. Duncan A.J. The economic design of x-chart used to maintain current control of the process. *Journal of the American Statistical Association*. 1956;51:228–242.
5. Faraz A., Heuchenne C. Double-objective economic statistical design of the VP T2 control chart: Wald's identity approach. *Journal of Statistical Computation and Simulation*. 2014;84:2123–2137.
6. Bahirae E., Raissi S. Economic Design of Hotelling's Control Chart on the Presence of Fixed Sampling Rate and Exponentially Assignable Causes. *Journal of Industrial Engineering International*. 2014;10:229–238.
7. Zentsova E.A. Comparative analysis of approaches to optimizing the parameters of the Hotelling control card. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of control processes*. 2017;(1):47–52. (In Russ.)
8. Klyachkin V.N., Kravtsov Yu.A. Diagnostics of the object's condition by the presence of non-random structures on the Hotelling map. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics*. 2013;(5):44–50. (In Russ.)
9. Zentsova E.A. Cost minimization model for a modified Hotelling map. *Informatika, modelirovanie, avtomatizatsiya proektirovaniya: VII Vseros. shkola-seminar aspirantov, studentov i molodykh uchenykh (IMAP-2015) = Informatics, modeling, design automation : VII All-Russian. The school is a seminar for graduate students, undergraduates and young scientists (IMAP-2015)*. UIGTU, 2015:138–143. (In Russ.)
10. Klyachkin V.N., Bart A.D. Assessment of the stability of quality indicators in drinking water purification. *Ekologicheskie sistemy i pribory = Ecological systems and devices*. 2017;(8):14–20. (In Russ.)
11. Alekseeva A.V. Optimization of the parameters of the generalized variance algorithm under multidimensional statistical control. *Prikladnaya matematika i informatika: sovremennye issledovaniya v oblasti estestvennykh i tekhnicheskikh nauk: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (shkola-seminar) molodykh uchenykh = Applied mathematics and computer science: modern research in the field of natural and technical sciences :*

*proceedings of the VIII International scientific and practical conference (school-seminar) of young scientists. Tol'yatti: Tol'yattinskiy gosudarstvennyy universitet, 2022:59–62. (In Russ.)*

12. Doornik J.A., Hansen H. An omnibus test for univariate and multivariate normality. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*. 2008;70:927–939.
13. Borovikov V.P. *Populyarnoe vvedenie v sovremennyy analiz dannykh i mashinnoe obuchenie na Statistica = A popular introduction to modern data analysis and machine learning on Statistica*. Moscow, 2018:288. (In Russ.)
14. Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Features of diagnostics of technical systems using multiclass classification. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):45–52. (In Russ.)
15. Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Statistical control of vibration stability of a hydraulic unit using the principal component method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):41–48. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### **Владимир Николаевич Клячкин**

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

##### **Vladimir N. Klyachkin**

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

##### **Виктория Олеговна Ташниченко**

магистрант,  
Финансовый университет  
при Правительстве Российской Федерации  
(Россия, г. Москва, пр-т Ленинградский, 49/2)  
E-mail: victoria.tashnichenko@gmail.com

##### **Victoria O. Tashnichenko**

Master degree student,  
Financial University under the Government  
of the Russian Federation  
(49/2 Leningradsky avenue, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 07.09.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 25.09.2024**

**Принята к публикации/Accepted 06.10.2024**

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛИТЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ ПРИБОРОВ

**А. Н. Литвинов**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
alekslitvinov@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассмотрены вопросы повышения виброустойчивости электронных блоков их заливкой полимерными компаундами. *Материалы и методы.* Приведены результаты экспериментальных исследований, построены уравнения регрессии, позволяющие теоретически прогнозировать коэффициент динамичности и резонансные частоты залитых блоков. *Результаты и выводы.* Полученные результаты помогают на ранних этапах проектирования электронных блоков принимать обоснованные конструкторско-технологические решения, позволяющие обеспечить требуемую виброустойчивость блоков в условиях их эксплуатации.

**Ключевые слова:** электронный блок, приборы автоматики, специзделия, заливка, компаунды, уравнения регрессии, динамические характеристики, экспериментальные исследования

**Для цитирования:** Литвинов А. Н. Прогнозирование динамических характеристик залитых электронных блоков приборов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 119–123. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-13

## FORECASTING OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF FLOODED ELECTRONIC DEVICE BLOCKS

**A.N. Litvinov**

Penza State University, Penza, Russia  
alekslitvinov@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The issues of increasing the vibration resistance of electronic components by filling them with polymer compounds are considered. *Materials and methods.* The results of experimental studies are presented, regression equations are constructed that allow theoretically predicting the dynamicity coefficient and resonant frequencies of flooded blocks. *Results and conclusions.* The results obtained help to make sound design and technological decisions at the early stages of the design of electronic components, which allow to ensure the required vibration resistance of the blocks in their operating conditions.

**Keywords:** electronic block, automation devices, special products, filling, compounds, regression equations, dynamic characteristics, experimental studies

**For citation:** Litvinov A.N. Forecasting of dynamic characteristics of flooded electronic device blocks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = Reliability and quality of complex systems. 2024;(4):119–123. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-13

### Введение

Вопросы обеспечения виброустойчивости изделий приборостроения и отдельных электронных блоков приобретают важное значение при разработке новых и модернизации существующих конструкций в процессе проведения конструкторско-технологических работ по импортозамещению большой номенклатуры электронных блоков изделий приборостроения различного назначения [1].

Одним из этапов разработки вибростойких изделий является математическое моделирование динамического состояния элементов конструкций и электронных блоков при действии на изделия внешних эксплуатационных воздействий и выбор обоснованных конструкторско-технологических решений, обеспечивающих их эффективную виброзащиту и обеспечение тактико-технических характеристик изделия.

В серийном производстве электронных блоков изделий приборостроения для этого широко применяется заливка электронных блоков полимерными компаундами [2, 3]. Этот способ имеет как достоинства, так и недостатки, которые выражаются в неремонтопригодности залитых блоков и возникновении в них остаточных напряжений, которые могут явиться причиной снижения метрологических характеристик электронных блоков после их заливки.

Существенной особенностью залитого электронного блока является то, что существующие модели для аналитического моделирования его динамического состояния [3] неприменимы, так как этот блок является сложной гетерогенной структурой. Поэтому в настоящей работе применяются методы регрессионного анализа [4], позволяющего на основании статистической обработки экспериментальных данных получить уравнения регрессии, прогнозирующие требуемые динамические характеристики залитого электронного блока.

### Экспериментальные исследования динамических характеристик

Экспериментальные исследования динамических характеристик проводились на моделях печатных плат из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита СФ-2 размерами  $(125 \times 77 \times 1)$  мм;  $(125 \times 55 \times 1)$  мм;  $(77 \times 77 \times 1)$  мм. В качестве заливочного компаунда применялся пенополиуретан ППУ-305А, который имеет широкое практическое применение в блоках приборов автоматики. Всего испытывались 124 платы. Заливка плат производилась по технологии предприятия.

В качестве основных параметров, характеризующих динамическое состояние плат, были приняты низшая (первая) резонансная частота  $f$  (в Гц) и безразмерный максимальный коэффициент динамичности платы без заливки и с заливкой пенополиуретаном с различной кажущейся плотностью и разной высотой заливки.

В качестве безразмерных независимых переменных приняты:  $x_1 = a/b$ , где  $a$  и  $b$  – размеры пластины в плане (при  $a > b$ );  $x_2 = H/H_0$ , где  $H$  и  $H_0$  – толщина слоя заливки и толщина платы соответственно;  $x_3 = \rho/\rho_0$  – безразмерная плотность компаунда, где  $\rho_0$  – плотность материала платы;  $\rho$  – кажущаяся плотность материала заливки после его полимеризации.

Основные безразмерные независимые переменные изменялись в следующих диапазонах:

$$x_1 = 1, \dots, 2; \quad x_2 = 3, \dots, 15; \quad x_3 = (0,1 \dots 0,4) \text{ г/см}^3.$$

Для удобства исследования была введена безразмерная резонансная частота залитого блока  $\bar{f} = f/f_0$ , где  $f$  и  $f_0$  – резонансные частоты залитой и незалитой платы соответственно.

Предварительно были экспериментально определены резонансные частоты и коэффициенты динамичности для исследуемых плат без заливки. Значения этих характеристик приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения  $f_0$  и  $\beta$  для незалитых плат

| Динамические характеристики | Размеры платы, мм        |                          |                         |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                             | $125 \times 77 \times 1$ | $125 \times 55 \times 1$ | $77 \times 77 \times 1$ |
| $f_0$ , Гц                  | 265                      | 315                      | 575                     |
| $\beta$                     | 160                      | 133                      | 162                     |

Динамические испытания проводились в соответствии с ГОСТ 20.57.406-81 методом 100-1 при плавном изменении частоты гармонических колебаний.

Обработка экспериментальных данных проводилась методами дисперсионного и регрессивного анализа [4, 5]. Уравнения регрессии для безразмерной частоты  $\bar{f}$  и максимального коэффициента динамичности  $\beta$  для плат, залитых пенополиуретаном ППУ-305А, применялись в виде

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^3 b_j x_j + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^3 b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^3 b_{jj} x_j^2, \quad (1)$$

где коэффициенты  $b_0, b_{ij}, b_{jj}$  в функции отклика  $y$  для  $\bar{f}$  и  $\beta$  определялись по результатам экспериментов методом регрессивного анализа с применением критериев для оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии при уровне значимости  $q = 0,05$ .

После применения регрессионного анализа и перехода к натуральным значениям исследуемых факторов уравнения регрессии получены в следующем виде:

– для максимального коэффициента динамичности

$$\beta = -8,77 - 17,76x_1 + 8,51x_2 + 80,16x_3 - 1,82x_1x_2 + 218x_1x_3 - 23,9x_2x_3; \quad (2)$$

– для безразмерной резонансной частоты

$$\bar{f} = -0,917 + 1,21x_1 + 0,087x_2 + 4,25x_3 + 0,033x_1x_2 - 0,405x_1x_3 + 0,25x_2x_3 - 0,43x_1^2 - 0,004x_2^2 - 5,7x_3^2. \quad (3)$$

Коэффициенты  $b_{11}, b_{22}$  и  $b_{33}$  в выражении (2) оказались незначимыми.

Анализ полученных уравнений показывает, что основным фактором, определяющим динамические характеристики  $\beta$  и  $\bar{f}$ , является кажущаяся плотность пенополиуретана. Повышенная плотность снижает эффективность демпфирования, но повышает резонансную частоту за счет увеличения жесткости конструкции. Увеличение толщины заливки приводит к повышению эффективности демпфирования, которое оказывается существенным при низкой кажущейся плотности материала заливки.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости  $\beta$  и  $\bar{f}$  от плотности заливки  $\rho$  при  $a/b = 1,6$  и  $H/H_0 = 10$ , которые прогнозируются по полученным уравнениям регрессии (2) и (3) соответственно.

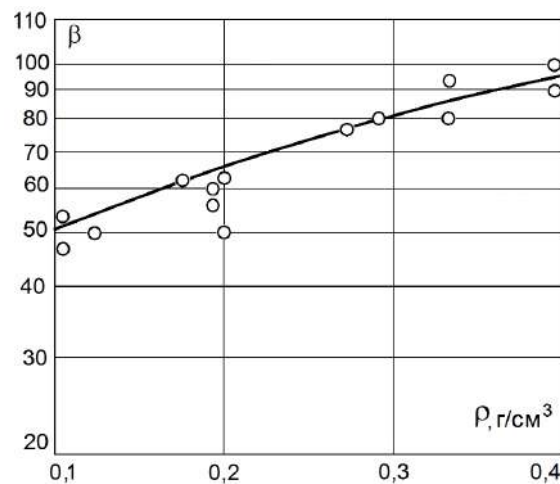


Рис. 1. Максимальный коэффициент динамичности залитой платы

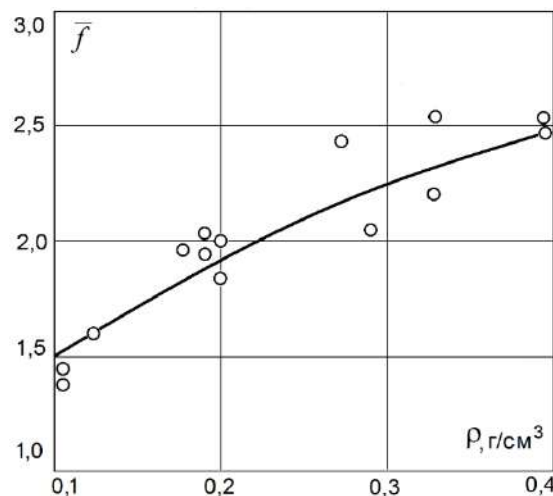


Рис. 2. Зависимость резонансной частоты от плотности заливки

Анализ представленных результатов показывает, что уравнения регрессии (2) и (3) для исследуемых диапазонов изменения основных параметров адекватно прогнозируют значения динамических характеристик  $\beta$  и  $f$ . По сравнению с результатами испытаний максимальная погрешность коэффициента динамичности  $\beta$  не превышает 23 %, а резонансной частоты  $f$  – 14 %. Такая погрешность прогнозирования динамических характеристик залитых блоков с помощью уравнений регрессии (2), (3) считается приемлемой для практических расчетов.

### Заключение

Представленные результаты показывают, что полученные уравнения регрессии с допустимой погрешностью позволяют прогнозировать основные динамические характеристики залитых плат на ранних этапах принятия конструкторско-технологических решений и отработке технологического процесса заливки для обеспечения требуемой виброустойчивости электронных блоков в условиях их эксплуатации.

### Список литературы

1. Кузьмин Э. Н. Обеспечение виброударопрочности оборудования и аппаратуры. Снежинск : Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. 320 с.
2. Зеленов Ю. В., Кирилин А. А., Слободник Э. Б., Талицкий Е. Н. Виброзащита радиоэлектронной аппаратуры полимерными композитами / под ред. Ю. В. Зеленева. М. : Радио и связь, 1984. 120 с.
3. Литвинов М. А., Литвинов А. Н. Анализ моделей для исследования вибростойкости изделий приборостроения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 60–65.
4. Статистические методы в инженерных исследованиях / под ред. Г. К. Круга. М. : Высш. шк., 1983. 216 с.
5. Налимов В. В., Чернова Н. Д. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М. : Наука, 1965. 340 с.
6. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Хилал С. Моделирование и прогнозирование потребности в информационном обеспечении системы здравоохранения Алжира // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 31–39.
7. Абрамов О. В. Прогнозирование состояния и планирование эксплуатации систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 5–14

### References

1. Kuz'min E.N. *Obespechenie vibroudarochnosti oborudovaniya i apparatury* = Ensuring vibration and shock resistance of equipment and apparatus. Snezhinsk: Izd-vo RFYaTs-VNIITF, 2003:320. (In Russ.)
2. Zelenev Yu.V., Kirilin A.A., Slobodnik E.B., Talitskiy E.N. *Vibrozhachita radioelektronnoy apparatury polimernymi kompozitami* = Vibration protection of radio electronic equipment with polymer composites. Moscow: Radio i svyaz', 1984:120. (In Russ.)
3. Litvinov M.A., Litvinov A.N. Analysis of models for studying vibration resistance of instrument-making products. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality. 2023;1:60–65. (In Russ.)
4. Krug G.K. (ed.). *Statisticheskie metody v inzhenernykh issledovaniyakh* = Statistical methods in engineering research. Moscow: Vyssh. shk., 1983:216. (In Russ.)
5. Nalimov V.V., Chernova N.D. *Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov* = Statistical methods of planning extreme experiments. Moscow: Nauka, 1965:340. (In Russ.)
6. Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Khilal S. Modeling and forecasting the need for information support for the Algerian healthcare system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = Reliability and quality of complex systems. 2022;(4):31–39. (In Russ.)
7. Abramov O.V. Forecasting the condition and operation planning of responsible systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = Reliability and quality of complex systems. 2020;(3):5–14. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

**Александр Николаевич Литвинов**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры теоретической  
и прикладной механики и графики,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: alekslitvinov@mail.ru

**Aleksandr N. Litvinov**  
Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of theoretical  
and applied mechanics and graphics,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**

**The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 19.09.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 12.10.2024**

**Принята к публикации/Accepted 20.10.2024**

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ ПРИБОРОВ, ЗАЛИТЫХ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПАУНДАМИ

**А. Н. Литвинов**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
alekslitvinov@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Одним из эффективных способов повышения вибро- и ударопрочности электронных блоков и приборов автоматики изделий специального назначения является полная или частичная заливка электронных блоков полимерными компаундами различной плотности и жесткости. *Материалы и методы.* Указаны особенности технологического процесса заливки блоков, установлены основные характеристики, влияющие на эффективность виброзащиты путем заливки блоков приборов. *Результаты и выводы.* Показана необходимость построения регрессионных уравнений, позволяющих на ранних этапах проектирования блоков прогнозировать их динамические характеристики и обеспечивать оптимальное вибродемпфирование электронных блоков в реальных условиях их эксплуатации.

**Ключевые слова:** электронный блок, приборы автоматики, специзделия, виброзащита, заливка, компаунды, оптимизация, экспериментальные исследования

**Для цитирования:** Литвинов А. Н. Экспериментальные исследования динамических характеристик блоков приборов, залитых полимерными компаундами // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 124–129. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-14

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF DEVICE BLOCKS FILLED WITH POLYMER COMPOUNDS

**A.N. Litvinov**

Penza State University, Penza, Russia  
alekslitvinov@mail.ru

**Abstract.** *Background.* One of the effective ways to increase the vibration and impact resistance of electronic components and automation devices for special-purpose products is the complete or partial filling of electronic components with polymer compounds of various densities and stiffness. *Materials and methods.* The features of the technological process of pouring blocks are indicated, the main characteristics affecting the effectiveness of vibration protection by pouring blocks of devices are established. *Results and conclusions.* It is shown that it is necessary to construct regression equations that allow predicting their dynamic characteristics at the early stages of block design and ensuring optimal vibration damping of electronic blocks in real operating conditions.

**Keywords:** electronic unit, automation devices, special products, vibration protection, filling, compounds, optimization, experimental research

**For citation:** Litvinov A.N. Experimental studies of the dynamic characteristics of device blocks filled with polymer compounds. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(4):124–129. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-14

### Введение

Одним из эффективных способов повышения вибро- и ударопрочности электронных блоков и приборов автоматики изделий специального назначения является полная или частичная заливка электронных блоков полимерными компаундами различной плотности и жесткости [1, 2].

Существенной особенностью технологического процесса заливки электронных блоков является то, что сам технологический процесс заливки часто является нестабильным, длительным, а в ряде случаев приводит к отказам электронных блоков после технологической операции заливки блока. Это

связано с тем, что в процессе заливки происходит полимеризация компаунда, сопровождающаяся выделением тепла и газообразованием. Это в свою очередь приводит к образованию повышенного избыточного давления в области заливки и его действию на корпуса электрорадиоизделий (ЭРИ) и микросборок, расположенных в электронном блоке в области заливки компаундом. Как показал проведенный анализ электронных блоков приборов автоматики, доля отказов по электропараметрам после технологической операции заливки может составлять до 55 % в общем объеме отказов.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что выполнение технологического процесса заливки может способствовать появлению потенциально дефектных блоков. Например, если в области заливки электронного блока расположены ЭРИ или микросборки, заключенные в герметичные корпуса, то в результате воздействия на корпус микросборки избыточного давления и остаточных напряжений в компаунде происходит деформация граней, приводящая к деформации плат, кристаллов и других элементов, расположенных внутри корпуса микросборки и, как следствие, к изменению выходных электропараметров и снижению надежности микросборки. Таким образом, микросборка в электронном блоке, даже если не наступил ее отказ, после заливки может оказаться потенциально дефектным элементом с пониженной надежностью.

При работе в эксплуатационном режиме на блок и микросборку действуют дополнительные механические и тепловые нагрузки, которые приводят к дополнительным деформациям корпусов микросборок или ЭРИ, нарушению их технико-технологических характеристик и, возможно, к отказу электронного блока или прибора в целом. Таким образом, технологическая заливка электронных блоков является ответственной технологической операцией, которая существенным образом определяет реальную надежность электронных блоков приборов, а выбор режимов заливки и полимерных материалов для заливки является весьма актуальной задачей по обеспечению их надежности. Существенной особенностью применения залитых блоков в приборах является то, что, как правило, эти блоки являются неремонтопригодными, что существенно увеличивает их стоимость.

#### Результаты экспериментальных исследований динамических характеристик залитых электронных блоков

Исследования динамических характеристик залитых блоков проводились на моделях печатных плат из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита СФ-2 блоков приборов. Марка заливочных материалов, геометрические размеры моделей, толщина заливки и фактические значения кажущейся плотности пенополиуретанов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материалы, применяемые для заливки блоков

| Номер испытуемого объекта | Размеры платы, мм | Компаунд  | Толщина слоя заливки, мм | Кажущаяся плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------|-------------------|-----------|--------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1                         | 125 × 77 × 1      | ППУ-305А  | 3                        | 0,16                                                         |
|                           |                   |           | 5                        | 0,10; 0,19; 0,27; 0,41                                       |
|                           |                   |           | 8                        | 0,19                                                         |
|                           |                   |           | 10                       | 0,10; 0,19; 0,22; 0,29; 0,30                                 |
|                           |                   |           | 12                       | 0,20                                                         |
|                           |                   |           | 15                       | 0,10; 0,17; 0,25; 0,27; 0,34                                 |
| 2                         | 125 × 65 × 1      | ППУ-305А  | 3                        | 0,19                                                         |
|                           |                   |           | 5                        | 0,13; 0,20; 0,29; 0,32; 0,35                                 |
|                           |                   |           | 8                        | 0,20                                                         |
|                           |                   |           | 10                       | 0,10; 0,17; 0,19; 0,20; 0,29; 0,33; 0,40                     |
|                           |                   |           | 12                       | 0,20                                                         |
|                           |                   |           | 15                       | 0,10; 0,17; 0,20; 0,25; 0,27; 0,34                           |
| 3                         | 77 × 77 × 1       | ППУ-305А  | 5                        | 0,1; 0,19; 0,28; 0,33; 0,34                                  |
|                           |                   |           | 10                       | 0,1; 0,19; 0,24; 0,35; 0,44                                  |
|                           |                   |           | 15                       | 0,1; 0,19; 0,21; 0,27                                        |
| 4                         | 100 × 50 × 1,5    | ППУ-305А  | 16                       | 0,11; 0,17; 0,20                                             |
|                           |                   | ППУ-202-2 | 16                       | 0,12; 0,17; 0,19                                             |
|                           |                   | ПДИ-3АК   | 16                       | 0,95                                                         |
|                           |                   | ППУ-305А  | 11                       | 0,13; 0,22                                                   |
| 5                         | Блок РС           | ППУ-3     | 11                       | 0,22; 0,26                                                   |
|                           |                   | ПДИ-3АК   | 11                       | 0,95                                                         |

Заливка блоков и моделей производилась в разъемные формы из алюминиевого сплава Д16.

Динамические испытания залитых блоков и моделей плат, закрепленных в четырех угловых точках, проводились методом качающейся частоты 100–1 на вибростенде в соответствии с ГОСТом при виброускорении на столе вибростенда  $a_0 = 1,0g^1$ . Испытания производились в нормальных условиях и в термокамере в эксплуатационном диапазоне температур от  $-60^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$ .

На рис.1 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) печатных плат размером  $(100 \times 50 \times 1,5)$  мм, залитых компаундом толщиной 16 мм.

Кривая 1 соответствует незалитой плате; 2 – залитой ППУ-305А с  $\rho = 0,17 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; 3 – залитой ППУ-202-2 с  $\rho = 0,17 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; 4 – плате, залитой ПДИ-ЗАК с  $\rho = 0,95 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Результаты испытаний плат и блоков с другими кажущимися плотностями заливки качественно аналогичны результатам динамических испытаний, представленными на рис. 1. Значение коэффициента динамичности  $\beta$  представлено для испытательного частотного диапазона  $f = (10 \dots 2000)$  Гц, который соответствует эксплуатационному диапазону частот приборов автоматики для авиационной техники.

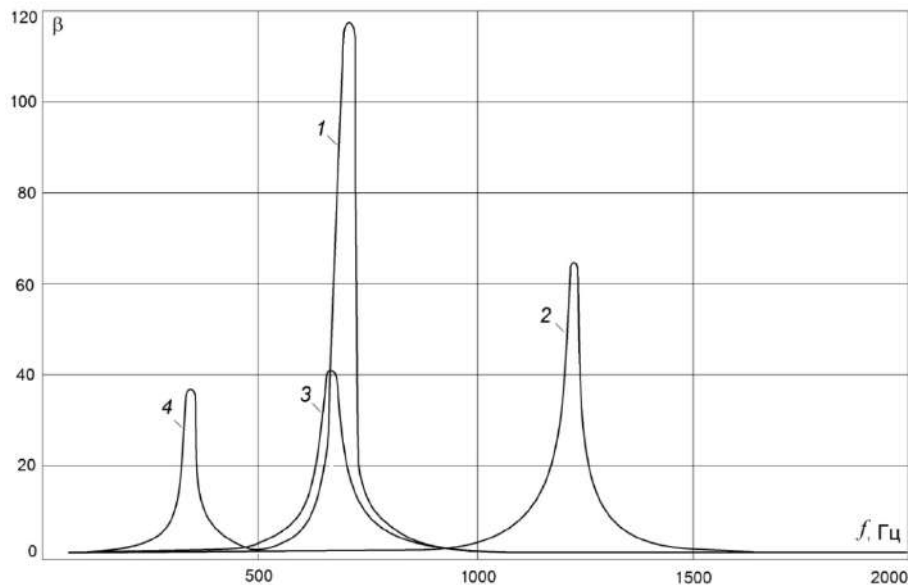


Рис. 1. АЧХ печатных плат

Из полученных зависимостей следует, что применение различных компаундов существенно влияет как на демпфирующую способность, так и на резонансную частоту платы, при этом применение жесткого пенополиуретана ППУ-305А приводит к существенному повышению резонансной частоты. Наибольшей эффективностью демпфирования обладает полужесткий компаунд ПДИ-ЗАК, обладающий довольно высокой плотностью, что приводит к снижению резонансной частоты при данной толщине демпфирующего слоя. Применение полужесткого пенополиуретана ППУ-202-2 позволяет более эффективно демпфировать резонансные колебания по сравнению с ППУ-305А, так как он обладает более высоким коэффициентом механических потерь, при этом собственные частоты колебаний платы изменяются незначительно из-за малой величины динамического модуля упругости пенополиуретана.

На рис. 2 представлены зависимости максимальных значений коэффициента динамичности при изменении действующего на столе вибростенда ускорения в диапазоне  $a = (0,5 \dots 3,0)g$  для испытуемого объекта 4 (см. табл.1); кривая 1 и 2 соответствуют заливке ППУ-305А при  $\rho = 0,11 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho = 0,17 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; кривые 3 и 4 соответствуют заливке ППУ-202-2 при  $\rho = 0,12 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho = 0,17 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  соответственно. Снижение максимального коэффициента динамичности при увеличении действующего виброускорения объясняется эффектом возрастания декремента затухания колебательной системы при возрастании амплитуды циклических напряжений, возникающих при действии вибрации.

<sup>1</sup> ГОСТ 20.57.406-81. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические методы испытаний.

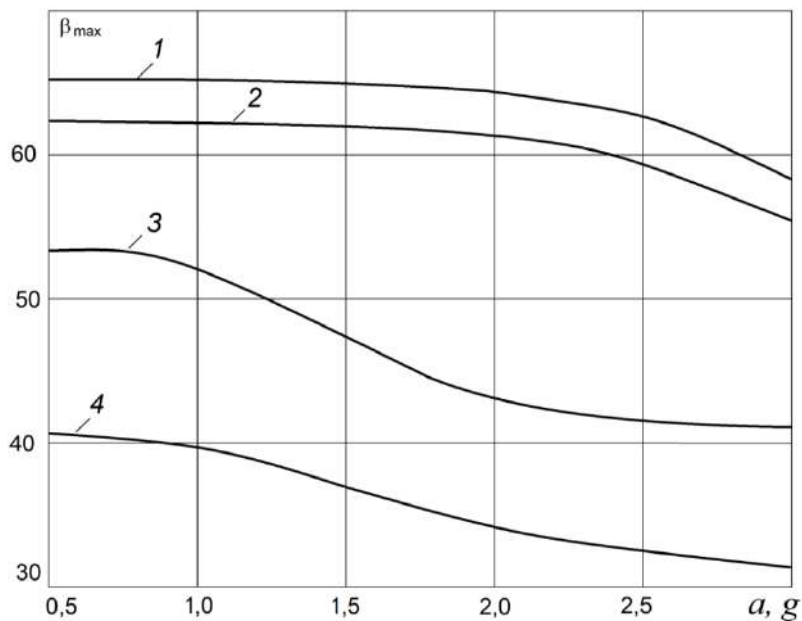


Рис. 2. Зависимости максимального коэффициента от величины внешнего воздействия

На рис. 3 приведены АЧХ заливой платы реального блока 5 (см. табл. 1), который крепился к столу вибростенда в четырех угловых точках при виброускорении на столе  $a = 0,5 \text{ g}$ . Кривые на рис. 3 соответствуют: 1 – плата без ЭРИ; 2 – плата с установленными на нее ЭРИ; 3 – плата с ЭРИ залита ПДИ-ЗАК; 4 – заливой ППУ-305А с  $\rho = 0,13 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; 5 – заливой ППУ-3 с  $\rho = 0,22 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; 6 – заливой ППУ-3с  $\rho = 0,25 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; 7 – заливой ППУ-305А с  $\rho = 0,22 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

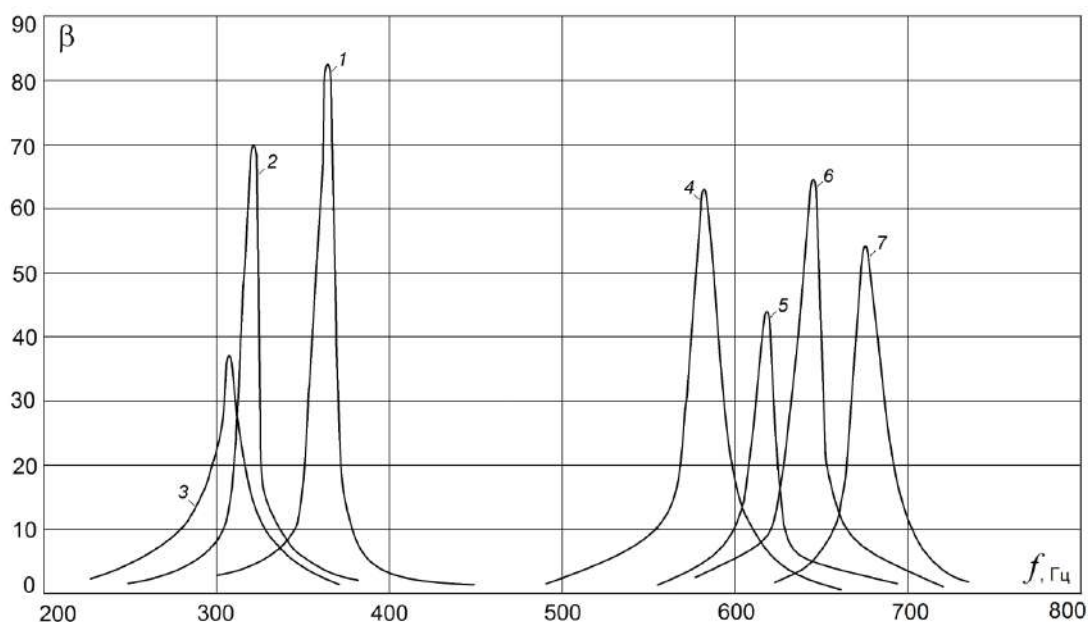


Рис. 3. АЧХ плат блоков РС при различных материалах заливки

Анализ полученных результатов показывает, что наличие ЭРИ на плате в залитом блоке приводит к уменьшению коэффициента динамичности платы. В процессе испытаний на резонансной частоте платы при ускорении  $a = 1,0 \text{ g}$  имело место разрушение выводов конденсатора. Значения резонансных частот и максимальных значений плат залитых электронных блоков существенно зависят от жесткости и плотности заливки. Наиболее эффективным является применение заливочного материала ПДИ-ЗАК, обеспечивающего наименьшее значение максимального коэффициента динамичности платы с ЭРИ в залитом электронном блоке.

В табл. 2 приведены экспериментальные результаты исследования динамических характеристик пакетов печатных плат, залитых пенополиуретаном ППУ-305А при толщине заливки  $H$ .

Таблица 2

Динамические характеристики пакетов печатных плат

| Измеряемый параметр                                   | Размеры платы, мм       |                                                       |                                                       |                                                       |                          |                                                       |                                                       |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|                                                       | $77 \times 77 \times 1$ |                                                       |                                                       |                                                       | $125 \times 77 \times 1$ |                                                       |                                                       |
|                                                       | Без заливки             | залитый                                               |                                                       |                                                       | Без заливки              | залитый                                               |                                                       |
|                                                       |                         | $H_1 = 10 \text{ мм}$<br>$\rho = 0,17 \text{ г/см}^3$ | $H_1 = 15 \text{ мм}$<br>$\rho = 0,16 \text{ г/см}^3$ | $H_1 = 15 \text{ мм}$<br>$\rho = 0,17 \text{ г/см}^3$ |                          | $H_1 = 10 \text{ мм}$<br>$\rho = 0,14 \text{ г/см}^3$ | $H_1 = 15 \text{ мм}$<br>$\rho = 0,16 \text{ г/см}^3$ |
| Резонансная частота $f$ , Гц                          | 548                     | 1454                                                  | 1519                                                  | 1537                                                  | 290                      | 913                                                   | 923                                                   |
| Максимальный коэффициент динамичности, $\beta_{\max}$ | 127                     | 54,6                                                  | 67                                                    | 43                                                    | 110                      | 106                                                   | 90                                                    |

Установлено, что резонансная частота пакетов повышается с увеличением толщины и плотности заливки в 2,8...3,2 раза. Максимальный коэффициент динамичности при этом снижается на 3,6...6,6 %. С увеличением площади поверхности плат демпфирующая способность плат снижается.

### Заключение

Полученные экспериментально результаты зависимостей динамических характеристик залитых блоков показывают, что их коэффициент динамичности и резонансные частоты существенно зависят от размеров блока, объема кажушейся плотности заливки и применяемого материала заливки. Необходимо отметить, что плотность заливки существенно зависит от технологического режима заливки блоков, который на практике часто является достаточно нестабильным, что приводит к большому разбросу динамических характеристик блоков в одной партии при их изготовлении.

Экспериментально полученные результаты не позволяют получить аналитические зависимости динамических характеристик от основных конструкторско-технологических параметров: толщины и объема, марки применяемого для заливки компаунда, его кажушейся плотности, режима заливки и т.п. Поэтому для достижения оптимального вибродемпфирования залитых электронных блоков необходимо на основании экспериментальных данных, полученных для различных заливочных материалов строить регрессионные уравнения [3], позволяющие прогнозировать основные динамические характеристики залитых электронных блоков, и на ранних этапах проектирования приборов принимать оптимальные конструкторско-технологические решения по обеспечению требуемой виброзащиты электронных блоков за счет их заливки вибродемпфирующими компаундами [4, 5].

### Список литературы

1. Кузьмин Э. Н. Обеспечение виброударопрочности оборудования и аппаратуры. Снежинск : Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. 320 с.
2. Голушко А. Н. Внутренние напряжения в герметизирующих композитах РЭА. М. : Сов. радио, 1971. 104 с.
3. Налимов В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М. : Наука, 1965. 340 с.
4. 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 // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 5–11.
5. 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.

### References

1. Kuz'min E.N. *Obespechenie vibroudaroprochnosti oborudovaniya i apparatury* = Ensuring vibration and shock resistance of equipment and apparatus. Snezhinsk: Izd-vo RFYaTs-VNIITF, 2003:320. (In Russ.)
2. Golushko A.N. *Vnutrennie napryazheniya v germetiziruyushchikh kompozitakh REA* = Internal stresses in sealing composites of REA. Moscow: Sov. radio, 1971:104. (In Russ.)

3. Nalimov V.V. *Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov* = *Statistical methods of planning extreme experiments*. Moscow: Nauka, 1965:340. (In Russ.)
4. 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.)
5. Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V. The phenomenon of "survivability" in the tasks of ensuring the reliability of complex critically important dynamic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = *Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):21–27. (In Russ.)

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Александр Николаевич Литвинов**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры теоретической  
и прикладной механики и графики,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: alekslitvinov@mail.ru

**Aleksandr N. Litvinov**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of theoretical  
and applied mechanics and graphics,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**

**The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 19.09.2024**

**Поступила после рецензирования / Revised 12.10.2024**

**Принята к публикации / Accepted 19.10.2024**

## ПЕРСПЕКТИВА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И КОМПЛЕКСОВ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Д. Ю. Байдаров<sup>1</sup>, А. С. Григорьев<sup>2</sup>, О. Г. Лосев<sup>3</sup>, Н. Н. Сафронова<sup>4</sup>, И. А. Тутнов<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Госкорпорация «Росатом», Москва, Россия

<sup>2, 3, 5</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>4</sup> Ассоциация организаций строительного комплекса атомной отрасли, Москва, Россия

<sup>1</sup> d\_baydarov@mail.ru, <sup>2</sup> grigorev\_as@nrcki.ru, <sup>3</sup> losev\_og@nrcki.ru, <sup>4</sup> safronova\_nn@accni.ru, <sup>5</sup> tutnov\_ia@nrcki.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Перспективы децентрализованного энергоснабжения автономных потребителей, дислоцируемых в труднодоступных, малонаселенных, со сложными геофизическими и климатическими условиями жизнедеятельности районов России, в первую очередь арктического региона, указывают на актуальность нового переосмысления технологии проектирования, создания и эксплуатации автономных энергетических установок, комплексов и систем с малой установленной мощностью. *Материалы и методы.* Рассмотрены возможные пути энергоснабжения автономных потребителей за счет применения энергетических установок и комплексов малой мощности, проведен краткий обзор и анализ существующих проблем энергетической безопасности автономных потребителей, предложен путь нового развития процессов проектирования, изготовления и эксплуатации автономных энергетических установок для децентрализованного энергоснабжения потребителей. *Результаты и выводы.* Представлены основные положения и концепция формирования методологии проектирования, эксплуатации и вывода из эксплуатации мобильных энергетических установок малой мощности на платформе интегральных методов физико-технологической и экономической оценки возможности обеспечения энергетической безопасности регионов.

**Ключевые слова:** энергетическая система, электроснабжение, автономность, безопасность, методология, надежность, экспериментальная физика

**Для цитирования:** Байдаров Д. Ю., Григорьев А. С., Лосев О. Г., Сафронова Н. Н., Тутнов И. А. Перспектива практического применения энергетических установок и комплексов энергоснабжения малой мощности // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 130–139. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-15

## THE PROSPECT OF PRACTICAL APPLICATION POWER PLANTS AND COMPLEXES LOW-POWER POWER SUPPLY

D.Yu. Baydarov<sup>1</sup>, A.S. Grigoriev<sup>2</sup>, O.G. Losev<sup>3</sup>, N.N. Safronova<sup>4</sup>, I.A. Tutnov<sup>5</sup>

<sup>1</sup> State Corporation "Rosatom", Moscow, Russia

<sup>2, 3, 5</sup> National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>4</sup> Association of Organizations of the Nuclear Industry Construction Complex, Moscow, Russia

<sup>1</sup> d\_baydarov@mail.ru, <sup>2</sup> grigorev\_as@nrcki.ru, <sup>3</sup> losev\_og@nrcki.ru, <sup>4</sup> safronova\_nn@accni.ru, <sup>5</sup> tutnov\_ia@nrcki.ru

**Abstract.** *Background.* The prospects of decentralized energy supply to autonomous consumers located in remote, sparsely populated, with difficult geophysical and climatic conditions in the regions of Russia, primarily the Arctic region, indicate the relevance of a new rethinking of the technology of designing, creating and operating autonomous power plants, complexes and systems with low installed capacity. *Materials and methods.* The article considers possible ways of energy supply to autonomous consumers through the use of low-power power plants and complexes, provides a brief overview and analysis of existing problems of energy security of autonomous consumers, and suggests a way for a new development of the processes of designing, manufacturing and operating autonomous power plants for decentralized energy supply to consumers. *Results and conclusions.* The main provisions and the concept of forming a methodology for the design, operation and decommissioning of low-power mobile power plants on the platform of integrated methods of physico-technological and economic assessment of the possibility of ensuring regional energy security are presented.

**Keywords:** energy system, power supply, autonomy, safety, methodology, reliability, experimental physics

**For citation:** Baydarov D.Yu., Grigoriev A.S., Losev O.G., Safronova N.N., Tutnov I.A. The prospect of practical application power plants and complexes low-power power supply. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):130–139. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-15

## Введение

Перспективы децентрализованного энергоснабжения автономных потребителей, дислоцируемых в труднодоступных, малонаселенных, со сложными геофизическими и климатическими условиями жизнедеятельности районов России, в первую очередь арктического региона [1], указывают на актуальность нового переосмысления технологии проектирования, создания и эксплуатации автономных энергетических установок, комплексов и систем с малой установленной мощностью. Энергетическая безопасность объектов и жизнедеятельности людей, которые находятся на значительном расстоянии от магистральных сетей энергоснабжения, с существенными ограничениями по доставке им необходимых грузов, формирует особую актуальность задачи – совершенствование методов проектирования, эксплуатации и вывода из эксплуатации оригинальных автономных систем энергоснабжения локальных потребителей. Для технологической инфраструктуры таких систем энергоснабжения становится важным проектирование, создание и надежная, безопасная эксплуатация современных энергетических установок и комплексов, которые в качестве основного энергетического ресурса используют ядерную и возобновляемую энергию, местные топливные ископаемые.

Примечательно отметить, что для надежного энергоснабжения автономных потребителей малой установленной мощности, например, для электропитания электронной аппаратуры, автономных и работающих по безлюдной технологии устройств мониторинга и контроля безопасности перемещения транспортных средств, например на траектории северного морского пути (СМП), технически могут быть использованы различные установки генерации тепловой и электрической энергии. В мире инновационные проекты создания и эксплуатации таких энергетических установок, например для автономных метеостанций, ведут специализированные компании США, Канады, Австралии, Норвегии и других ведущих морских держав [2, 3]. В последние годы и в России непрерывно увеличивается внимание к проектам по энергетической безопасности промышленных зон и агломераций, связанных с освоением природных ископаемых в труднодоступных районах страны с малой плотностью населения. Важным направлением деятельности в этих проектах является проектирование, создание и длительная надежная эксплуатация новых образцов автономных энергетических систем и комплексов, например, для энергоснабжения предприятий по добыче полезных ископаемых, метеостанций, устройств и информационно-измерительных систем транспортной охраны морских путей, морских платформ, портов и побережья. Решение таких задач требует создания автономных и редко обслуживаемых источников энергии с малой мощностью генерации. При этом к энергетической установке или системе предъявляются проектные требования с учетом обеспечения энергетической безопасности потенциального автономного потребителя. В их числе – низкое потребление топливных энергоресурсов; минимальная потребность в сервисных работах на всем периоде эксплуатации, высокая противояварийная устойчивость и др. Таким образом, для текущего момента существует насущная потребность в новых разработках как технологии, так и перспективных образцов автономных источников энергоснабжения – на базе интегрального использования достижений науки и экспериментальной физики. Поэтому обладают очевидной новизной поиск и верификация современных научно-технических решений, методологий и инструментальных алгоритмов, обеспечивающих достижение перспективных технологий проектирования, изготовления и эксплуатации энергетических систем и комплексов малой установленной мощности для децентрализованного энергоснабжения локальных потребителей.

Важно отметить, что централизованное сетевое энергоснабжение пока охватывает менее 40 % территории планеты. Свыше 1 млрд человек проживает в условиях локальной генерации как тепловой, так и электрической энергии. Помимо северных территорий России, необходимость в создании малых локальных энергосистем и комплексов наблюдается на северных территориях Канады, в Гренландии, на территории Южной Америки, на территории Африки, Австралии, в ряде азиатских стран. По различным оценкам мировая потребность в источниках генерации энергии малой и средней мощности составляет от 18 до 80 ГВт [4, 5]. К текущему моменту результаты развития общей методологии постоянного улучшения процессов проектирования, эксплуатации и вывода из эксплуатации малых локальных энергокомплексов показывают в дальнейшем перспективу проектов автономных распределительных энергетических систем.

Автономные энергетические установки и системы могут быть использованы в народном хозяйстве Российской Федерации и имеют высокую степень своей коммерциализации в таких сферах экономической и деловой жизнедеятельности, активного природопользования, как обеспечение энергетической безопасности автономных потребителей энергии, безаварийного судовождения, надежного безлюдного дистанционного метеогеофизического и экологического мониторинга, эффективного контроля за движением транспортных средств, морских и речных судов на фарватерах и подходах к портам, а также и на других подлежащих контролю морских и воздушных рубежах страны. Отличительной особенностью современной технологии улучшения процессов проектирования, эксплуатации и вывода из эксплуатации энергетических установок и комплексов энергоснабжения малой мощности должно стать периодическое уточнение срока службы конкретного объекта длительно работающей автономной системы энергообеспечения локального потребителя с учетом фактической ситуации по истории действующих эксплуатационных нагрузок и внешних воздействий, деградации служебных свойств по функциональной безопасности, надежности и других обстоятельств, важных для безопасности генерации энергии. Таким образом, сказанное выше, а также положения государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» (постановление Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 г. № 366), в части создания нового оборудования и технологий обеспечения энергетической безопасности в удаленных районах Арктики подчеркивает своевременность постановки и проведения новых исследований для развития научных подходов, принципов, методологии и технологий для улучшения процессов проектирования, эксплуатации и вывода из эксплуатации автономных энергетических установок и комплексов энергоснабжения децентрализованных потребителей малой мощности.

**Концептуальные положения и научные принципы совершенствования технологии улучшения процессов проектирования, эксплуатации и вывода из эксплуатации энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью**

Система управления качеством инновационных проектов [6], парадигма методов экспериментальной физики [7], подходы в части энергоснабжения Арктической зоны Российской Федерации [8–10] традиционно ориентируют любую деятельность по развитию энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью локальных потребителей на приоритетное использование целевого проектного подхода, первоначального документированного определения базовых положений будущих технических решений. В нашем случае это будет концепция совершенствования методов, инструментов, технологии и самих процессов проектирования, эксплуатации, вывода из эксплуатации энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью в диапазоне от нескольких киловатт до 20 мегаватт.

Основными составляющими этой концепции, со всей очевидностью, могут быть:

- формулирование основных научных положений, принципов, концептуальных подходов и приоритетов при организации и реализации деятельности по проектированию, изготовлению, эксплуатации энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью;
- формирование свода критериев качества, технико-экономической эффективности и экологической приемлемости результатов проектирования, изготовления (монтажа), эксплуатации энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью локального потребителя в труднодоступных и малонаселенных районах РФ;
- новое аналитическое переосмысление положений, запретов и методических рекомендаций действующей нормативной и правовой базы государственного технического, экологического регулирования безопасности жизнедеятельности в области проектирования, создания и эксплуатации, вывода из эксплуатации энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью, формирование и верификация предложений по ее совершенствованию;
- систематизация и анализ накопленного научно-технического и практического опыта исследовательских и инженерных работ, известных технических решений и патентов по технологии проектирования, изготовления, эксплуатации энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью;
- выработка рекомендаций по выбору наиболее эффективных путей и методов совершенствования технологии и улучшения процессов проектирования, эксплуатации и вывода энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения из эксплуатации;

– формирование информационной модели и свода приоритетных основных направлений реализации Концепции, в том числе работы по выполнению новых проектов пилотных мобильных энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью на базе системного подхода и передовых достижений науки, применения принципов рационального природопользования и экологической безопасности территорий.

Основные составляющие и информационная модель концепции физико-технологического развития и постоянного совершенствования проектирования и создания энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью, являющиеся инвариантными к планируемым служебным характеристикам будущих автономных энергетических систем или отдельных энергоустановок, включая установленную мощность, назначаемые проектные сроки безопасной эксплуатации и прочее, для общего случая, показаны на рис. 1.



Рис. 1. Основные составляющие и информационная модель концепции физико-технологического развития автономных энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью

В рамках данной модели применяются: уже апробированные и новые методы проектирования и обоснования гарантий, культуры безопасности, экологической приемлемости ядерных установок [8], методы интегрального технического регулирования, экологической экспертизы, экспертизы обоснования безопасности и экспертизы промышленной безопасности, надежности и безаварийности сложных технических систем, управления рисками их длительного функционирования; экспериментальной физики и метрологии. За счет управления качеством проекта и технологии, комплексной системы организационно технических, инженерных мероприятий обеспечивают приемлемый уровень надежности, безопасности, экологической и экономической приемлемости будущей системы децентрализованного энергоснабжения малой мощностью автономного потребителя в целом.

Исходя из экспертного анализа свода первоочередных задач, на начальном этапе формируют основные мероприятия по реализации данной концепции с учетом принципов: «обеспечение необходимости»; «обеспечение условий», «обеспечение возможностей» для вновь проектируемой технологии системы децентрализованного энергоснабжения малой мощностью автономного потребителя.

#### **Примеры реализации концепции совершенствования технологии проектирования, эксплуатации и вывода из эксплуатации энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью**

Ниже в случайном порядке демонстрируются некоторые варианты реализации, названной выше концепции для отдельных этапов жизненного цикла локальных распределительных энергосистем на основе ядерных энергетических установок, установок использующих возобновляемые источники энергии, установок комбинированного типа.

Этап 1 – процедура формирования матрицы актуальной информации и обоснование эффективности проекта децентрализованного энергоснабжения автономного потребителя малой мощностью

по критерию энергетической безопасности потребителя. Для этого рассматриваются особые условия и социальная, иная потребность для совершенствования системы «топливо и энергоснабжение» отдельно взятого региона, района, территориально-административного образования, промышленной агломерации, отдельного предприятия, поселения, с высокой степенью детализации. Как правило, развитие удаленных российских регионов требует создания соответствующей информационно-телекоммуникационной инфраструктуры, развертывания современных средств связи, автомобильной, аэро- и морской навигации, метеорологического и гидрологического мониторинга окружающей среды и многого другого. Для электроснабжения компонентов такой инфраструктуры, со всей очевидностью, необходимы автономные источники электроэнергии. Ранее для этих аналогичных целей широко применялись радиоизотопные термоэлектрические генераторы [9], использующие в качестве источника энергии радиоактивный распад стронция-90. Выпуск таких генераторов к концу XX в. был полностью прекращен, а все ранее действующие источники генерации малой мощности энергии на их основе выработали свой ресурс. Поэтому появился социальный заказ на новое проектирование и создание энергоустановки иного типа. При этом важным критерием для выбора предпочтительной и приемлемой энергоустановки являются интегральные затраты и себестоимость энергии. На рис. 2 в части реализации названный выше концепции представлен сравнительный анализ себестоимости электроэнергии для различных видов генерации.

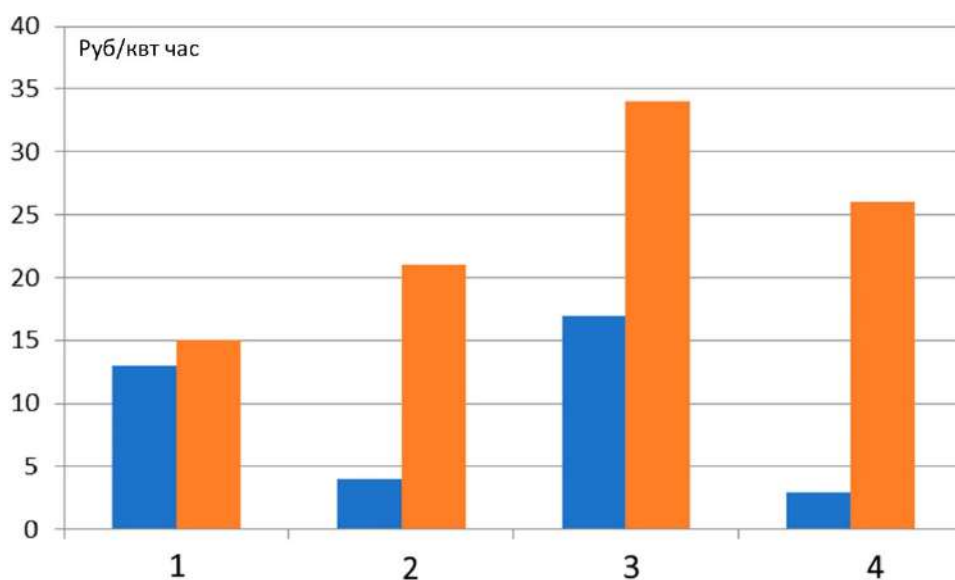


Рис. 2. Вероятностная оценка (нижняя, слева и верхняя, с права) себестоимости энергии для автономного энергокомплекса, дислоцируемого в Арктической зоне РФ: 1 – на основе малой ядерной энергетической установки; 2 – на основе ветрогенераторов и солнечных коллекторов; 3 – на основе двигателей внутреннего сгорания; 4 – энергетическая установка комбинированного типа

Для большинства проектных условий децентрализованного обеспечения энергией автономных потребителей малой мощности в Арктической зоне РФ установки комбинированного типа обеспечивают более низкую себестоимость электроэнергии по сравнению с конкурирующими технологиями (дизельными, ветровыми и солнечными электростанциями). При этом для повышения надежности автономного энергоснабжения потребителей, если в энергетической установке объединить два или больше источника генерации энергии, то они будут дополнять или замещать друг друга в случае необходимости. Например, при недостаточной солнечной энергии основную часть нагрузки автономного потребителя будет брать на себя ветрогенератор, а при отсутствии ветра или аварийной ситуации энергетическая установка или комплекс когенерационного типа будет производить электроэнергию на базе тепловых двигателей, топливных элементов или ядерного топлива. Таким образом, можно обосновать актуальность нового задания на проектирование энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью потенциальных потребителей, включив в него данные о конкретных их потребностях в части необходимой тепловой и (или) электрической энергии.

Этап 2. Цель, задачи – определение условий и возможностей применения технологии энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью состоит в верифицированном выборе приемлемого и эффективного решения по критериям энергетической безопасности автономного потребителя. На данном этапе поиск решения задачи – создания технологии и новых перспективных образцов энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью многими экспертами определяется, в нашем случае для труднодоступных территорий Арктической зоны России, целесообразностью и потребностью в разработке автономной системы тепло- и электроснабжения. Эти оригинальные условия реализации технологии определяют состав оборудования перспективной энергетических установок или комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью, с учетом значимых факторов: реализация проектного топливо-энергетического баланса для автономного потребителя в Арктической зоне Российской Федерации в части генерации тепловой и электрической энергии; географической дислокации потребителя, сезонных и суточных изменений геоклиматической обстановки, оптимизации затрат и иных условий на потребление углеводородного топлива, сокращения затрат на эксплуатацию установки. В качестве перспективных энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью в Арктике экспертами [11] приоритетно предлагаются к рассмотрению варианты проектов гибридной установки на основе ядерного топлива и современных топливных элементов. В этом варианте с успешным использованием дополнительного источника энергоресурсов, например за счет возобновляемых источников энергии и местных топливных ресурсов, можно смягчить влияние ряда негативных факторов, таких как: относительно невысокая инсоляция в северных широтах или даже ее полное отсутствие в период «полярной ночи»; неравномерное распределение мощности ветрового потока в течение года, а в ряде регионов – его относительно невысокий природный потенциал. Вместе с этим процесс «Формулировка и постановка основных задач» требует аналитического рассмотрения известных и уже хорошо апробированных технических решений для будущего функционирования энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью, например, путем сравнения служебных характеристик ранее известных энергетических установок и комплексов. Заключительный шаг этого этапа состоит в том, что тип и количество элементов конструктивной схемы энергетических установок и комплексов, систем децентрализованного энергоснабжения потребителей малой мощностью, а также показатели соотношения по вырабатываемой электрической и тепловой энергии будет определяться расчетным и экспериментальным путем на стадии проектирования под конкретное техническое задание на основе имитационного моделирования процессов и будущего поведения энергокомплекса на всех будущих этапах жизненного цикла такой энергетической техники.

Следующий важный этап концепции – выбор и обоснования принципов и общих положений, в части будущей технологии создания и эксплуатации перспективных образцов энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью. Например, для основных принципов в разрезе совершенствования нормативной базы важной для управления качеством и культурой промышленной, экологической и ядерной безопасности при проектировании и эксплуатации энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью могут быть рекомендованы следующие:

- обеспечение общей культуры безопасности энергетической техники, как непереносимое условие осуществления любой деятельности в области энергоснабжения автономных потребителей;
- системное управление рисками и состоянием функциональной безопасности надежности и экологической приемлемости как технологии, так и самих элементов энергетических установок и в целом комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью;
- государственный надзор и отраслевой контроль за деятельностью в сфере технологий энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью в условиях рыночной экономики.

Вместе с этими принципами применяются и принципы государственной поддержки процессов развития автономного энергоснабжения на базе традиционных топливных ресурсов и возобновляемых источников энергии, которые валидированы в целях улучшения социально-экономических условий жизнедеятельности в труднодоступных, с малой плотностью населения регионов Арктической зоны Российской Федерации. Это принципы обеспечения технического прогресса и создания условий для развития экономики страны с учетом научно-технических достижений, промышленной, экологической, экономической возможностей; приоритетного государственного технического регулирования

инженерно-экономических процессов в сфере рационального природопользования; повышения уровня энергетической безопасности хозяйства автономного потребителя энергии на основе формирования и реализации соответствующих федеральной, межрегиональных и региональных программ развития альтернативной энергетики. При этом должно быть обеспечено соблюдение баланса интересов государства, прав и охраняемых законом интересов граждан и организаций, участвующих в деятельности по развитию альтернативной энергетики; взаимная ответственность личности, общества и государства за обеспечение промышленной и экологической безопасности. При этом возможен сценарий, когда фактическое получение положительного результата технологии энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью у конечного потребителя, не компенсирует величину риска, возможных опасностей и вреда. В этой связи моделирование функционирования энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью и вероятностный анализ последствий от промышленной деятельности, в частности ядерных энергетических установок, которые выполняются в рамках информационной модели концепции, определяют перспективный вектор для правовой и нормативной основы имитационного моделирования процессов технологического совершенствования и перспективных проектов энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью. Поэтому на последующих этапах реализации названной выше концепции имитационное моделирование и дополнительный вероятностный анализ промышленной, экологической, ядерной и радиационной безопасности энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью может обеспечивать рациональное стратегическое планирование для их будущего функционирования.

Важными составляющими представляемой концепции являются система менеджмента качества всего жизненного цикла конкретного проекта, план реализации концепции и свод первоочередных мероприятий реализации технологии и проекта энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью в целом.

Ключевым этапом концепции является ее план реализации и первоочередные мероприятия основных и вспомогательных процессов нового проекта энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью. В числе этих мероприятий важное место занимает верификация, тестирование и натурные испытания технических решений по технологии энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью. Например, верификационные исследования и испытания проектов энергоустановок для энергоснабжения производственных объектов арктического шельфа доказали, что их применение с соответствующей системой эксплуатационного мониторинга живучести автономного источника генерации энергии позволяет генерировать в нужный период определенную и необходимую для потребителям электроэнергию. Натурные испытания, которые были спланированы на платформе методов экспериментальной физики, также убедительно показали, что явным преимуществом энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью комбинированного типа на базе топливных элементов, по отношению к традиционным двигателям внутреннего сгорания, является их относительная простота в эксплуатации и техническом обслуживании, а также отсутствие выброса токсичных газов.

Принципиально важным заключительным этапом представляемой концепции является экспертиза промышленной, экологической, радиационной и ядерной безопасности энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью, а также постоянный аналитический мониторинг достижений и промахов предлагаемой технологии проектирования. Инструментами такого мониторинга в нашем случае являются как прямые измерения, тестовые испытания, наблюдения, так и традиционные приемы, и методы экспериментальной физики, документированные процедуры системы менеджмента качества данного проекта. В частности, в нашем случае для анализа используется хорошо апробированный метод на базе построения диаграмм Парета и Исикавы. На базе построения этих диаграмм выявляются слабые места тестируемой разработки и формируются планы, предложения по улучшению технологии и самих пилотных образцов энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью. К сожалению, в настоящее время ключевая задача количественного определения риска будущей эксплуатации энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью пока в полном объеме не решена. Принимая во внимание, что количественные показатели риска и безопасности энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения

малой мощностью должны быть сопоставимы между собой, многие специалисты [11, 12] подчеркивают важность задачи создания общей методологической базы для регламентации процедуры их мониторинга и количественной оценки с учетом различных условий будущей эксплуатации энергетического объекта или комплекса, данных о фактическом состоянии важных для безопасности компонентов и инженерных систем энергетического объекта, включая системы автоматики и управления, линии связи, трубопроводы и пр.

### Заключение

Представленным выше материалом может быть определен общий замысел перспективы и концепция технологии автономных энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью потребителей в труднодоступных регионах РФ и вместе с этим значимые факторы опасностей для таких потребителей. Тем самым создаются необходимые условия для оптимизации процедуры управления рисками эксплуатации энергетических систем и комплексов с малой установленной мощностью по критериям энергетической безопасности. Данная концепция инвариантна к оригинальному составу принципов действия и конструктивных особенностей энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью, уже получила свою положительную апробацию при создании оригинальных установок, которые достаточное время уже успешно функционируют в промышленном режиме для энергоснабжения автономных потребителей в труднодоступных районах Арктической зоны Российской Федерации. Для конкретных заданий снабжения локального потребителя энергией, основанных на результатах расчетных и экспериментальных исследований вариантов энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью, количественных оценок надежности и риска будущего энергоснабжения, интегрального инженерного и экономического анализа приемлемости проекта энергетической установки для конкретных условий ее будущего функционирования, в рамках представленной выше концепции может быть успешно выбрана оптимальная технологии и программа управления сроком службы конкретной и оригинальной энергоустановки или энергетической распределенной системы для энергоснабжения потенциальных потребителей энергии. При этом для решающего правила по приоритетному выбору лучшего из возможных вариантов технологии энергетических установок и комплексов децентрализованного энергоснабжения малой мощностью и самого изделия априорно может быть принят принцип приемлемых величин ущерба и социального риска от возможных аварий и катастроф [13, 14], которые вероятностными прогнозами диагностируются для будущего периода эксплуатации.

### Список литературы

1. Научно-технические проблемы освоения Арктики // Научная сессия Общего собрания членов РАН (16 декабря 2014 г.) / под ред. Н. П. Лаверова, В. И. Васильева, А. А. Макоско. М. : Наука, 2015. 490 с.
2. Chem Nayar. Innovative Remote Micro-Grid Systems // International Journal of Environment and Sustainability. 2012. Vol. 1, № 3. P. 53–65.
3. Гольцов Е. Н., Гречко Г. И., Куликов Д. Г. [и др.]. Малая атомная энергогенерация // Арктические ведомости. 2017. № 4. С. 44–53.
4. BP Energy Outlook 2016 edition. URL: <http://www.bp.com/> BP 2016
5. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. Институт энергетических исследований РАН / Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. М. : ИНЭИ РАН, 2014.
6. Загидуллин Р. Р. Оптимальное управление качеством : монография. Старый Оскол : ТНТ, 2012. 124 с.
7. Пергамент М. И. Методы исследований в экспериментальной физике : учеб. пособие. Долгопрудный : Интеллект, 2010. 300 с.
8. 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 // Нефтегаз. 2018. № 1. С. 24–29.
9. Apalin V. F., Vasin S. E., Grigoriev A. S. [et al.]. Continual radiation monitoring of submerged or sunken objects containing spent nuclear fuel in arctic seas // Atomic Energy. 2012. Vol. 111, № 6. P. 439–444.
10. Глотов В. И., Тутнов А. И. Система мониторинга факторов экономического, технического, правового и иного вида рисков для энергетической безопасности отдельно взятого региона РФ // Труды Вольного экономического общества России. 2009. Т. 130. С. 78–87.
11. Гольцов Е. Н., Гречко Г. И., Куликов Д. Г. [и др.]. Автономные атомные энергоисточники для энергообеспечения объектов Министерства обороны РФ // Национальная оборона. 2017. № 9. С. 42–43.

12. Власов С. В., Степанов В. В., Тутнов И. А. Промышленная безопасность трубопроводов воды и пара высокого давления. М. : МГТУ им. Баумана, 2011. 210 с.
13. Исикава К. Японские методы управления качеством : сокр. пер. с англ. / науч. ред. и авт. предисл. А. В. Гличев. М. : Экономика, 1988. 215 с
14. Власов С. В. Силантьева Л. Г., Сарычев Г. А. [и др.]. Управление риском эксплуатации и промышленной безопасностью объектов энергетических систем // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2012. № 1. С. 33–37.
15. 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.
16. Бойкова Т. В., Григорьев А. С., Маколкин Д. В. [и др.]. Качество и надежность энергосистем малой мощности // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 28–37.
17. Звенигородский И. И., Зырянов Ю. Т., Ульшин Д. И. Использование нейросетевых регуляторов для повышения энергоэффективности и качества системы вентиляции и кондиционирования воздуха заглубленного сооружения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 99–105.
18. Коршунов Г. И., Сольнищев Р. И., Фролова Е. А. Обеспечение качества и создание интеллектуальных систем коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 92–101.

### References

1. Scientific and technical problems of Arctic exploration. *Nauchnaya sessiya Obshchego sobraniya chlenov RAN (16 dekabrya 2014 g.) = Scientific session of the General Meeting of RAS Members (December 16, 2014)*. Ed. by N.P. Laverov, V.I. Vasil'ev, A.A. Makosko. Moscow: Nauka, 2015:490. (In Russ.)
2. Chem Nayar. Innovative Remote Micro-Grid Systems. *International Journal of Environment and Sustainability*. 2012;1(3):53–65.
3. Gol'tsov E.N., Grechko G.I., Kulikov D.G. et al. Small nuclear power generation. *Arkticheskie vedomosti = Arctic Bulletin*. 2017;(4):44–53. (In Russ.)
4. *BP Energy Outlook 2016 edition*. Available at: <http://www.bp.com/> BP 2016
5. Forecast of global and Russian energy development up to 2040. Institute of Energy Research of the Russian Academy of Sciences / Analytical Center under the Government of the Russian Federation. Moscow: INEI RAN, 2014. (In Russ.)
6. Zagidullin R.R. *Optimal'noe upravlenie kachestvom: monografiya = Optimal quality management : monograph*. Staryy Oskol: TNT, 2012:124. (In Russ.)
7. Pergament M.I. *Metody issledovaniy v eksperimental'noy fizike: ucheb. posobie = Research methods in experimental physics : a textbook*. Dolgoprudnyy: Intellect, 2010:300. (In Russ.)
8. Pimenov A.O., Kulikov D.G., Gol'tsov E.N., Grechko G.I. Energy supply in the Arctic. Prospects and problems of the development of small-scale nuclear generation as a source of energy supply to deposits and remote facilities. *Neftegaz = Neftegaz*. 2018;(1):24–29. (In Russ.)
9. Apalin V.F., Vasin S.E., Grigoriev A.S. et al. Continual radiation monitoring of submerged or sunken objects containing spent nuclear fuel in arctic seas. *Atomic Energy*. 2012;111(6):439–444.
10. Glotov V.I., Tutnov A.I. Monitoring system of economic, technical, legal and other types of risks for energy security of a particular region of the Russian Federation. *Trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii = Proceedings of the Free Economic Society of Russia*. 2009;130:78–87. (In Russ.)
11. Gol'tsov E.N., Grechko G.I., Kulikov D.G. et al. Autonomous nuclear power sources for energy supply of facilities of the Ministry of Defense of the Russian Federation. *Natsional'naya oborona = National Defense*. 2017;(9): 42–43. (In Russ.)
12. Vlasov S.V., Stepanov V.V., Tutnov I.A. *Promyshlennaya bezopasnost' truboprovodov vody i para vysokogo davleniya = Industrial safety of high-pressure water and steam pipelines*. Moscow: MGTU im. Bauman, 2011:210. (In Russ.)
13. Isikava K. *Yaponskie metody upravleniya kachestvom: sokr. per. s angl. = Japanese methods of quality management : a short translation from English*. Moscow: Ekonomika, 1988:215. (In Russ.)
14. Vlasov S.V. Silan'teva L.G., Sarychev G.A. et al. Risk management of operation and industrial safety of energy systems facilities. *Upravlenie kachestvom v neftegazovom komplekse = Quality management in the oil and gas complex*. 2012;(1):33–37. (In Russ.)
15. 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 consumers of low power. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*. 2019;(2):92–103. (In Russ.)
16. Boykova T.V., Grigor'ev A.S., Makolkin D.V. et al. 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.)

17. Zvenigorodskiy I.I., Zyryanov Yu.T., Ul'shin D.I. The use of neural network regulators to improve the energy efficiency and quality of the ventilation and air conditioning system of a buried structure. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):99–105. (In Russ.)
18. Korshunov G.I., Sol'nitsev R.I., Frolova E.A. Quality assurance and creation of intelligent corrosion protection systems for pipeline transport of energy carriers. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):92–101. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Дмитрий Юрьевич Байдаров

кандидат юридических наук,  
директор департамента поддержки новых бизнесов,  
Госкорпорация «Росатом»  
(Россия, г. Москва, ул. Большая Ордынка, 24)  
E-mail: d\_baydarov@mail.ru

#### Dmitry Yu. Baidarov

Candidate of law sciences, director of the department  
for support of new businesses,  
State Corporation "Rosatom"  
(24 Bolshaya Ordynka street, Moscow, Russia)

#### Александр Сергеевич Григорьев

кандидат технических наук,  
начальник отдела,  
НИЦ «Курчатовский институт»  
(Россия, г. Москва, ул. Академика Курчатова, 1)  
E-mail: grigorev\_as@nrcki.ru

#### Aleksandr S. Grigoriev

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

#### Остап Геннадьевич Лосев

научный сотрудник,  
НИЦ «Курчатовский институт»  
(Россия, г. Москва, ул. Академика Курчатова, 1)  
E-mail: \_losev\_og@nrcki.ru

#### Ostap G. Losev

Researcher,  
National Research Center "Kurchatov Institute"  
(1 Akademik Kurchatov street, Moscow, Russia)

#### Наталья Николаевна Сафронова

кандидат экономических наук,  
заместитель генерального директора,  
Ассоциация организаций строительного  
комплекса атомной отрасли  
(Россия, г. Москва, ул. Обручева, 30/1)  
E-mail: safronova\_nn@accni.ru

#### Natalia N. Safronova

Candidate of economical sciences,  
deputy general director,  
Association of Organizations of the Nuclear  
Industry Construction Complex  
(30/1 Obrucheva street, Moscow, Russia)

#### Игорь Александрович Тутнов

доктор технических наук, профессор,  
начальник лаборатории,  
НИЦ «Курчатовский институт»  
(Россия, г. Москва, ул. Академика Курчатова, 1)  
E-mail: tutnov\_ia@nrcki.ru

#### Igor A. Tutnov

Doctor of technical sciences, professor,  
head of the laboratory,  
National Research Center "Kurchatov Institute"  
(1 Akademik Kurchatov street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 16.09.2024

Поступила после рецензирования/Revised 14.10.2024

Принята к публикации/Accepted 28.10.2024

# БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

## SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.051, 006.015.8, 519.718, 519.876.2

doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-16

### АДАПТАЦИЯ И РАЗВИТИЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕТОДОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ К УПРАВЛЕНИЮ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬЮ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР

А. В. Маслобоев<sup>1</sup>, В. Н. Цыгичко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова  
Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

<sup>1</sup> Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра  
«Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

<sup>2</sup> Институт системного анализа Федерального исследовательского центра  
«Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>1</sup> a.masloboev@ksc.ru, <sup>2</sup> vtsygichko@inbox.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Исследование направлено на разработку методов и информационных технологий мониторинга и оценки жизнеспособности критически важных объектов и инфраструктур для повышения эффективности ситуационного управления этими сложными динамическими системами. Актуальность работы обусловлена необходимостью построения и интеграции адаптивных управляющих систем обеспечения безопасности и устойчивости функционирования критических инфраструктур в условиях деструктивного воздействия на образующие их элементы негативных факторов и возросшей потребностью в научно-методической и информационно-аналитической поддержке решаемых задач на всех этапах жизненного цикла управления жизнеспособностью критически важных объектов. *Материалы и методы.* Теоретической основой исследования является общая теория анализа риска и безопасности, современная концепция жизнеспособности и методология управления организационными системами. Методологический подход к решению проблемы повышения устойчивости функционирования критических инфраструктур базируется на сопряжении методов риск-менеджмента безопасности и адаптивного управления жизнеспособностью. *Результаты и выводы.* Предложено расширение области применения аппарата методологии комплексной оценки факторов риска нарушения безопасности критически важных объектов, разработанной в Институте системного анализа РАН, в части его адаптации к управлению жизнеспособностью критических инфраструктур. Адаптированный подход, основанный на многоуровневом анализе модели потенциальных угроз, уязвимостей и эффективности мер и средств противодействия, обеспечивает агрегированную оценку уровня жизнеспособности и обоснованный выбор профилей восстановления и адаптации критических функций системы при заданном виде действующих угроз. Такой риск-ориентированный подход может найти применение для информационно-аналитического обеспечения деятельности операторов критических инфраструктур как инструмент превентивной аналитики и ситуационного управления жизнеспособностью критически важных объектов.

**Ключевые слова:** управление, риск, жизнеспособность, безопасность, критическая инфраструктура, критически важный объект, метод оценки, анализ уязвимостей

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

**Для цитирования:** Маслобоев А. В., Цыгичко В. Н. Адаптация и развитие риск-ориентированной методологии обеспечения безопасности критически важных объектов к управлению жизнеспособностью критических инфраструктур // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 140–159. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-16

## ADAPTING AND EXPANDING THE RISK-DRIVEN METHODOLOGY OF CRITICAL ENTITIES PROTECTION TO CRITICAL INFRASTRUCTURE RESILIENCE MANAGEMENT

A.V. Masloboev<sup>1</sup>, V.N. Tsygichko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Center  
"Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia

<sup>1</sup> Institute of North Industrial Ecology Problems of the Federal Research Center  
"Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia

<sup>2</sup> Institute of Systems Analysis of the Federal Research Center "Computer Sciences  
and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1</sup> a.masloboev@ksc.ru, <sup>2</sup> vtsygichko@inbox.ru

**Abstract.** *Background.* The ongoing study is aimed at developing methods and information technologies for monitoring and assessing the resilience of critical entities and infrastructures to improve the efficiency of situational management of these complex dynamic systems. The urgency of this study is due to the need to design and integrate adaptive control systems to maintain the safety and stability of critical infrastructures under destructive impact of negative factors on their constituent elements, and the increased need for methodological, information and analytical support of the current control tasks at all phases of the resilience management life-cycle of critical entities. *Materials and methods.* The theoretical foundations of the study are the general theory of risk and fundamentals of safety analysis, the state-of-the-art resilience concept and the recent methodology of organizational systems management. The methodological approach to solving the problem of enhancing the stability of critical infrastructures is based on the conjugation of security risk-driven auditing and adaptive resilience management methods. *Results and conclusions.* The expansion of the range of application of the methodological apparatus for an integrated assessment of the security violation risk factors of critical entities, designed at the Institute of Systems Analysis of the Russian Academy of Sciences, in terms of its adaptation to critical infrastructure resilience management, has been proposed. An adapted approach based on a multi-level analysis of the potential threats model, vulnerabilities and the performance of countermeasures provides an aggregated assessment of the resilience level and a reasonable choice of recovery and adaptation profiles for maintaining and protecting the critical system functions for a given type of actuating threats. In practice, such a risk-driven approach can be used for information and analytical support of the critical infrastructure operators' activities as a tool for preventive analytics and situational control of the critical entities resilience.

**Keywords:** management, risk, resilience, safety, critical infrastructure, critical entity, assessment methodology, vulnerability analysis

**Financing:** the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling KSC RAS (project No. FMEZ-2022-0023).

**For citation:** Masloboev A.V., Tsygichko V.N. Adapting and expanding the risk-driven methodology of critical entities protection to critical infrastructure resilience management. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):140–159. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-16

### Введение

В современных условиях уровень развития экономики и обороноспособности нашей страны напрямую зависит от эффективности решения вопросов обеспечения устойчивого функционирования критически важных объектов, образующих критические инфраструктуры государства (энергетика и топливно-энергетический комплекс, транспорт, банковская сфера и финансовый рынок, горнодобывающий и металлургический комплексы, здравоохранение, оборонная и химическая промышленность, телекоммуникации и связь, атомная и ракетно-космическая промышленность, научно-технологический кластер и др.). Значимость проблем повышения эффективности управления устойчивостью критических инфраструктур для национальной безопасности государства подчеркивается в основополагающих нормативных и законодательных актах, принятых на государственном уровне во многих странах мира и мотивирующих научное сообщество к участию в поиске путей решения этих проблем с учетом имеющегося задела, опыта и компетенций в данной области<sup>1</sup>. Проблема обеспечения

---

<sup>1</sup> Стратегия национальной безопасности Российской Федерации : указ Президента РФ № 400 от 02.07.2021. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046/page/1> ; О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : федер. закон № 187-ФЗ от 26.07.2017. URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201707260023.pdf> ; Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : указ

безопасности критически важных объектов не является новой, а ее решением на протяжении многих десятилетий в той или иной степени занимаются специалисты во всех странах [1–3]. Однако в последнее время, несмотря на свой достаточно общий характер, эта проблема приобрела особое, стратегически важное значение практически для всех мировых держав в свете нарастающей эскалации отношений в военно-политической сфере и, как следствие, ужесточения требований к реализации систем и средств обеспечения безопасности функционирования критических инфраструктур и организаций в наиболее уязвимых отраслях экономики и государственного управления. Вместе с тем глобальность проблемы определяется разнообразием и масштабностью самих критических инфраструктур, а также высокой динамикой, множественностью и сложностью взаимосвязей входящих в их состав элементов. Остроты дискурса добавляют результаты российских и зарубежных исследований [4, 5], полученные в этом направлении в ходе реализации множества международных научно-исследовательских проектов, в том числе сугубо прикладных и междисциплинарных, которые декларируют наметившуюся за минувшие 5–10 лет тенденцию расширения теории безопасности и риска на концепцию жизнеспособности (в зарубежной научной литературе устоявшийся термин – «resilience») [6] организационных и технических систем, то есть смещения фокуса от вопросов обеспечения защищенности критически важных объектов и превентивного управления ими к вопросам смягчения последствий (ущерба) реализации потенциальных угроз и опасностей, поддержания критических функций, самовосстановления и развития адаптационных способностей этих объектов к воздействию негативных факторов, а посредством этого повышения общей устойчивости взаимосвязанных и взаимозависимых критических инфраструктур в целом. Такие перспективы для эволюции современной науки о безопасности видят ученые и эксперты [7] на основе анализа применимости современных методик, стандартов и лучших практик управления рисками, надежностью и безопасностью сложных динамических систем различной природы, масштаба и назначения. Стоит также отметить, что несовершенство нормативно-правовой базы и динамичность законодательства в сфере регулирования и обеспечения безопасности как в России, так и за рубежом вкупе с несогласованностью и противоречивостью отдельно взятых положений в регламентирующих документах, создают дополнительные трудности на пути к разработке и внедрению научно-обоснованных рекомендаций по выстраиванию эффективной системы организационного управления жизнеспособностью критических инфраструктур на всех уровнях принятия решений и стратегированию адаптивной защиты критически важных объектов.

Таким образом, сегодня существенно возрастает потребность в научно-методическом обеспечении процессов управления рисками нарушения безопасности критически важных объектов, учитывающем и реализующим идею, базовые положения и принципы концепции жизнеспособности, а его отсутствие или недостаточная функциональность могут привести к неадекватным результатам в оценке целевых показателей жизнеспособности критических инфраструктур и, следовательно, к снижению общей эффективности систем ситуационного управления, осуществляющих мониторинг, контроль безопасности и адаптацию к изменению среды/условий функционирования этих сложных распределенных объектов. Нивелированию выявленных недостатков в теории посвящено настоящее исследование как одна из попыток системного решения обозначенной проблемы путем сопряжения риск-ориентированного подхода к обеспечению безопасности критически важных объектов и бурно развивающейся методологии управления жизнеспособностью критических инфраструктур [8].

### Основные определения и постановка задачи

Критическая инфраструктура – относительно новый объект управления и обеспечения безопасности, закрепленный на законодательном уровне как в Российской Федерации, так и в зарубежных странах. Задачи мониторинга, ситуационного анализа и контроля безопасности и поддержки устойчивого функционирования критических инфраструктур находятся в зоне ответственности регуляторов и операторов (владельцев) критических инфраструктур.

---

Президента РФ № 145 от 28.02.2024. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/HHNazTI1guvX9Y00yaFA4-KkMWPYUcWS8.pdf>; Директива Совета Европейского Союза 2008/114/EC от 8 декабря 2008 г. «О Европейских критических инфраструктурах и мерах по их защите». URL: <https://base.garant.ru/70333008/>; Директива Европейского Парламента и Совета Европейского союза 2022/2557 от 14 декабря 2022 г. «Об устойчивости критически важных организаций». URL: <https://base.garant.ru/407633886/>; National Security Memorandum 22 on Critical Infrastructure Security and Resilience (April 30, 2024). URL: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2024/04/30/national-security-memorandum-on-critical-infrastructure-security-and-resilience/>

Критическая инфраструктура в соответствии с ФЗ-187 «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» определяется как часть гражданской инфраструктуры, представляющая собой совокупность физических или виртуальных систем и средств, важных для государства в такой мере, что нарушение их работоспособности либо полная деструкция могут привести к негативным, в том числе необратимым, последствиям для национальной экономики и обороноспособности страны<sup>1</sup>.

Критические инфраструктуры представляют собой «системы систем» и состоят из множества взаимосвязанных элементов, являющихся также сложными распределенными объектами (системами), локализованными на некоторой территории и имеющими критическое значение для функционирования друг друга, надсистемы и внешнего окружения, т.е. критические инфраструктуры – это открытые динамические многоуровневые системы [9], имеющие сложную организационную структуру и в которых нарушение работоспособности хотя бы одного из компонентов может привести к существенному снижению безопасности и жизнеспособности системы в целом или потере ее устойчивости (деградации и разрушению).

Критически важный объект является составным функциональным элементом (частью) критической инфраструктуры, выполняющим критически значимые функции в обеспечении нормального функционирования этой инфраструктуры и связанных с ней инфраструктурных объектов и систем жизнеобеспечения. Множество таких взаимосвязанных объектов образует иерархическую или сетевую структуру критической инфраструктуры, как многоуровневой распределенной системы. Критически важный объект также сам по себе является предметом защиты и может быть декомпозирован на критические элементы/процессы, имеющие общие и специфические уязвимости.

Уязвимость (слабое место) – это степень чувствительности системы к возникновению критических событий (сбоев, кризисов, атак) в результате воздействия негативных факторов, характеризующая состояние подверженности системы нарушению ее функциональности в условиях реализации внутренних и внешних угроз. Под угрозой понимается совокупность условий и факторов, создающих опасность жизненно важным функциям системы. Опасность – угроза в действии.

Под жизнеспособностью (от лат. *resiliere* – приходить в норму) [10] в широком смысле понимается способность системы восстанавливать свою функциональность (нормальное состояние функционирования) после наступления критических отказов или чрезвычайных ситуаций, повлекших нарушение ее исходного работоспособного состояния. В отечественной научной литературе жизнеспособность часто отождествляется с живучестью или устойчивостью и формализуется с использованием математического аппарата теории безопасности сложных систем [11]. Поэтому жизнеспособность наряду с безопасностью определяется как состояние защищенности системы, при котором влияние внешних и внутренних негативных факторов на элементы системы не приводит к ухудшению или к невозможности ее функционирования или развития [5, 12]. Это сложное макросостояние, характеризующее свойство сопротивляемости и адаптивности системы при воздействии множественных угроз, представляет собой множество согласованных устойчивых состояний функциональных элементов системы. В поле зарубежных исследований жизнеспособность трактуется через способность системы, подверженной влиянию деструктивных факторов, своевременно прогнозировать, всецело воспринимать и поглощать последствия негативных воздействий, противостоять им, гибко адаптироваться к непрерывным и непредсказуемым изменениям и восстанавливаться после реализации угроз и опасностей в приемлемое время, в пределах допустимых параметров деградации и с наименьшими затратами и потерями, включая полное или частичное сохранение своей структуры и жизненно важных функций [11].

В обобщенной формулировке жизнеспособность определяется как такое защитное свойство социально-экономической, организационной или технической системы, называемое самосохранением, при котором на выбранном интервале времени в условиях воздействия на элементы системы неопределенных по составу, типу и уровню внутренних и внешних угроз (дестабилизирующих факторов) [11]:

- реализуется комплекс превентивных антикризисных мер, обеспечивающих удаленность равновесных состояний и траекторий движения системы от критических ситуаций с заданным запасом прочности (живучести);

- система способна выполнять предписанные ей функции в заданных режимах и условиях функционирования с сохранением значений всех рабочих технологических параметров, показателей качества и динамических характеристик в этих допустимых пределах;

<sup>1</sup> О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : федер. закон № 187-ФЗ от 26.07.2017. URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201707260023.pdf>

– на основе универсальных законов управления с обратной связью гарантируется минимально допустимая потеря управляемости и качества функционирования, а также адаптивность и возможность полного или частичного восстановления функций системы при любых ограниченных возмущениях и воздействиях вне зависимости от их природы и масштаба.

Таким образом, исходя из обозначенной проблематики во введении к работе и данных выше определений, общая постановка проблемы повышения эффективности управления безопасностью и жизнеспособностью критических инфраструктур может быть сформулирована следующим образом: необходимо сформировать и поддерживать такие условия функционирования критических инфраструктур, при которых любое влияние на них внутренних и внешних факторов (угроз) не будет приводить к существенному отклонению рабочих характеристик критически важных объектов, образующих эти инфраструктуры, от нормальных значений, потерям управляемости или функциональности, а также к полной деструкции или неспособности восстанавливать критические функции и адаптироваться к воздействиям внешней среды, за счет адекватной информационно-аналитической и научно-методической поддержки решаемых задач на всех стадиях жизненного цикла управления жизнеспособностью системы (осознание и оценка рисков; профилактика и смягчение рисков; восприятие рисков и готовность к воздействию; мониторинг угроз/событий и своевременное предупреждение; сопротивление угрозам и поглощение влияющих факторов; реагирование и восстановление, адаптация и трансформация; познание опасностей и накопление опыта [13]) и создания эффективной системы адаптивного управления жизнеспособностью для всех значимых объектов, входящих в критические инфраструктуры, обеспечивающей адаптацию и противодействие всем видам актуальных угроз в соответствии с общими и специальными требованиями к надежности и безопасности этих объектов.

В данной работе под эффективностью системы управления жизнеспособностью будем понимать как ее способность к поддержанию (восстановлению и адаптации) критических функций (уязвимостей) элементов критической инфраструктуры в условиях воздействия на них множественных угроз различной природы и при возникновении неблагоприятных событий. В сущности, этот целевой показатель по аналогии с оценкой эффективности систем обеспечения безопасности [14] определяется как вероятность (риск) реализации угрозы в точке уязвимости функционирования объекта критической инфраструктуры при заданном наборе превентивных мер и средств противодействия известным угрозам. Под средствами противодействия понимается комплекс превентивных и корректирующих мероприятий, методов и инструментов, направленных на предотвращение, минимизацию и нейтрализацию рисков, угроз и последствий нарушения нормального функционирования критически важных объектов. Эти средства могут включать как физические, организационные, экономические и социальные меры, так и технические решения, основная цель которых состоит в обеспечении защиты и устойчивости критических инфраструктур к вероятным негативным воздействиям.

Методологический подход к решению поставленной проблемы рассматривается в последующих разделах работы.

### Материалы и методы

Мотивация к проведению комплексных исследований по рассматриваемой тематике обусловлена необходимостью решения ряда приоритетных задач в соответствии с указами Президента Российской Федерации:

– № 400 от 2 июля 2021 г. «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации»: п. 47 19) повышение эффективности мер по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера; п. 57 1) формирование безопасной среды оборота достоверной информации, повышение защищенности информационной инфраструктуры Российской Федерации и устойчивости ее функционирования<sup>1</sup>;

– № 645 от 26 октября 2020 г. «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года»: п. 17 а) выявление и анализ рисков возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, выработка способов предупреждения таких ситуаций; г) повышение уровня защищенности критически важных и потенциально опасных объектов, обеспечение устойчивости их функционирования при чрезвычайных ситуациях в арктических условиях; ж) развитие системы антикризисного управления в рамках единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций [15];

<sup>1</sup> Стратегия национальной безопасности Российской Федерации : указ Президента РФ № 400 от 02.07.2021. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046/page/1>

– № 164 от 5 марта 2020 г. «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года»: п. 14 б) разработка и внедрение технологий, имеющих критически важное значение для освоения Арктики, в том числе для решения задач в области обороны и обеспечения общественной безопасности, разработка материалов и техники для применения в арктических условиях; в) расширение деятельности по проведению исследований опасных природных и природно-техногенных явлений в Арктике, разработка и внедрение современных методов и технологий прогнозирования таких явлений в условиях меняющегося климата, а также методов и технологий снижения угроз жизнедеятельности человека [16].

Перечисленные задачи имеют важное социально-экономическое и геополитическое значение особенно в условиях развития цифровой экономики России, поэтому проблема повышения эффективности управления безопасностью и жизнеспособностью критических инфраструктур находится в центре внимания органов государственной власти и, как никогда, актуальна. Накопленный опыт позволяет охватить проблему, комбинируя традиционные и новые нестандартные методы решения на теоретическом и практическом уровне, однако, как уже отмечалось, на организационном и прикладном уровне могут возникнуть затруднения по причине противоречий в нормативно-правовой базе, отсутствия единого целеполагания и вполне естественной несогласованности интересов регуляторов и операторов (владельцев) критически важных объектов и инфраструктур. Такой потенциал имеется во многих странах.

При этом некоторые так называемые «policy-driven» исследования наших зарубежных партнеров, например работы [17, 18], подверженные политическому влиянию и пропаганде, декларируют зашоренность российской науки о безопасности, нередко умаляют достижения российских ученых в области теории риска и устойчивости сложных систем и тем самым пытаются неявно показать несостоятельность применяемых на практике в нашей стране инструментов и методов управления рисками, ссылаясь на морально устаревшую научную школу, законы, методики и стандарты 1990-х гг., которыми руководствуются российские специалисты при решении различных вопросов обеспечения безопасности и проектирования соответствующих средств защиты критически важных объектов и инфраструктур. По мнению авторов статьи, такая критика ничем не аргументирована. Более того, известны случаи, когда директивные документы по стратегированию безопасности ведущих стран мира, например [19], полностью отражают и даже частично воспроизводят в своей основе положения и результаты, полученные российскими исследователями. Данное обстоятельство скорее высвечивает мировое признание отечественных разработок, нежели ограниченность взглядов и горизонтов в такой критической сфере, как обеспечение безопасности. Одной из таких разработок, созданных в 90-е гг. прошлого столетия командой ученых из Института системного анализа РАН, является методология оценки рисков нарушения безопасности критически важных объектов национальной инфраструктуры страны [20, 21], реализованная в рамках программно-аппаратных комплексов «РискМенеджер», «АванГард» и др. [22]. Этот уникальный модельный и программный инструментарий предложен группой исследователей под руководством профессоров В. Н. Цыгичко и Д. С. Черешкина и развит в 2000-е гг. их учениками А. А. Кононовым, А. Б. Стилиславским, Е. Г. Новицким и другими для конкретных актуальных приложений в сфере обеспечения комплексной безопасности информационной и транспортной инфраструктур. Позднее элементы этой теории и методологии были успешно применены в системах управления ситуационных центров для задач синтеза и оценки эффективности средств обеспечения региональной безопасности [14]. Имеющиеся наработки хорошо ложатся на область управления жизнеспособностью критических инфраструктур, что расширяет сферу их применения.

Для адаптации данной риск-ориентированной методологии обеспечения безопасности критически важных объектов к управлению жизнеспособностью критических инфраструктур использовались как отечественные, так и зарубежные нормативно-правовые акты, стандарты и материалы исследований, представленные в работах [2, 4, 8, 18, 23]<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство ; ПНСТ 905-2023. Критическая информационная инфраструктура. Доверенные программно-аппаратные комплексы. Термины и определения ; ГОСТ Р 56875-2016. Информационные технологии. Системы безопасности комплексные и интегрированные. Типовые требования к архитектуре и технологиям интеллектуальных систем мониторинга для обеспечения безопасности предприятий и территорий ; Стратегия национальной безопасности Российской Федерации : указ Президента РФ № 400 от 02.07.2021. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046/page/1> ; О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : федер. закон № 187-ФЗ от 26.07.2017. URL:

Общая структура анализа, постановки и решения проблем управления безопасностью критически важных объектов и инфраструктур приведена на рис. 1.



Рис. 1. Общая структура постановки и решения проблем управления безопасностью

Методология оценки рисков нарушения безопасности критически важных объектов [21] по своему замыслу и функциональности согласуется с известными на сегодняшний день решениями в области управления жизнеспособностью, например [24], и современными стандартами риск-менеджмента<sup>1</sup>. Это позволяет говорить о возможности интеграции и комбинированного использования этих разработок, что может дать полезный эффект в части получения более точных и адекватных оценок показателей жизнеспособности критических инфраструктур в процессе управления этими объектами. Проверка этой гипотезы является самостоятельной задачей и выходит за рамки настоящей работы. Решение этой задачи является предметом дальнейших исследований.

Далее будут рассмотрены структура адаптированной методологии и реализующие ее процедуры в контексте задачи управления жизнеспособностью критических инфраструктур. Концептуальная идея, лежащая в основе этой методологии, заключается в последовательном вычислении эффективности средств обеспечения жизнеспособности элементов критической инфраструктуры как интегральной оценки рисков возникновения неблагоприятных событий, т.е. в терминах теории безопасности речь идет об определении степени защищенности (уровня самосохранения) системы в зависимости от используемых средств поддержания ее критических функций (уязвимостей) от воздействия множественных внешних и внутренних угроз различной природы с учетом влияния ситуационных факторов. К таким защитным средствам относятся средства восприятия и поглощения угроз, восстановления и адаптации системы после сбоя и т.п. Другими словами, риски потери функциональности (полная или частичная утрата критических функций) элементов критической инфраструктуры напрямую зависят от возможностей средств превентивного управления и противодействия актуальным угрозам ее нормального функционирования, т.е. от эффективности системы обеспечения жизнеспособности, и определяются через соответствующие оценки уязвимостей и защитных мер, реализуемых как на уровне отдельных элементов, так и системы в целом. Получаемые оценки по реагированию каждой критической функции системы на разные типы угроз агрегируются по всем уровням организации системы и проецируются на общий показатель жизнеспособности критической инфраструктуры, который затем интерпретируется на основе определенной шкалы оценок риска. Такой системный подход обеспечивает обоснованный выбор комплекса антикризисных мер по восстановлению функциональности, а также средств противодействия и адаптации к потенциальным угрозам жизнеспособности, что позволяет повысить эффективность системы управления функционированием критически важных объектов и инфраструктур в целом.

<http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201707260023.pdf> ; Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента РФ № 145 от 28.02.2024. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/HHNAzTl1guvX9Y00yaFA4KkMWPYcWS8.pdf> ; Директива Совета Европейского Союза 2008/114/ЕС от 8 декабря 2008 г. «О Европейских критических инфраструктурах и мерах по их защите». URL: <https://base.garant.ru/70333008/> ; Директива Европейского Парламента и Совета Европейского союза 2022/2557 от 14 декабря 2022 г. «Об устойчивости критически важных организаций». URL: <https://base.garant.ru/407633886/> ; National Security Memorandum 22 on Critical Infrastructure Security and Resilience (April 30, 2024). URL: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2024/04/30/national-security-memorandum-on-critical-infrastructure-security-and-resilience/>

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство.

### Результаты и обсуждение

Входная информация, необходимая для применения предлагаемого методического инструментария в практике управления жизнеспособностью критических инфраструктур, включает:

- перечень критически важных объектов по секторам критических инфраструктур, их функциональных характеристик и критических состояний;
- перечень критериев и индикаторов, по которым оцениваются различные аспекты жизнеспособности для разных типов критических инфраструктур, то есть систему целевых показателей жизнеспособности;
- паспорта критически важных объектов, содержащие сведения о пространственно-временных, технологических, организационно-технических, нормативно-правовых и прочих ограничениях, связанных с процессами обеспечения безопасности и жизнеспособности этих объектов;
- нормативные документы федерального, регионального, муниципального, а также отраслевого и объектового уровня, регламентирующие общие требования и специфичные критерии к параметрам надежности, безопасности и устойчивости функционирования критических инфраструктур и образующих их функциональных элементов;
- организационные и технические регламенты межведомственного взаимодействия и информационного обмена по вопросам контроля и обеспечения безопасности критических инфраструктур, а также ситуационного управления состоянием инфраструктурных объектов;
- характеристику информационной, функциональной и организационной структуры управления безопасностью и жизнеспособностью критических инфраструктур и входящих в их состав элементов;
- полные описания технологических (производственных) и технико-экономических особенностей процессов функционирования критически важных объектов, взаимосвязей между ними, выполняемых задач и критических функций;
- модели актуальных внутренних и внешних угроз для всех секторов критических инфраструктур и точек уязвимостей вероятной реализации потенциальных угроз в структуре параметров функционирования критически важных объектов;
- перечень влияющих ситуационных факторов, способов их возможной реализации и допустимых вариантов воздействия на функциональные элементы и объекты критических инфраструктур;
- накопленные ретроспективные данные о произошедших инцидентах (критических отказах и событиях) на объектах критических инфраструктур вследствие реализации угроз;
- классификатор и модели чрезвычайных и кризисных ситуаций (прогнозируемые и непрогнозируемые);
- планы превентивных антикризисных мероприятий в типовых чрезвычайных и кризисных ситуациях на критически важных объектах, сценарные модели управления критическими событиями;
- перечень органов и субъектов управления (операторов/владельцев и регуляторов) безопасностью и жизнеспособностью критических инфраструктур, а также характеристики их профиля, сферы ответственности и компетенций;
- спецификации эффективных организационных структур управления безопасностью и жизнеспособностью элементов критических инфраструктур;
- проектные решения по организации систем и средств обеспечения безопасности и жизнеспособности критически важных объектов, с учетом имеющихся в наличии ресурсов (кадровых, технических, финансовых и т.д.) и применяемого комплекса мер противодействия угрозам устойчивого функционирования критических инфраструктур.

Сбор и преобразование необходимых данных является весьма трудоемким процессом и нуждается в автоматизации. Исходная информация, в том числе оперативная – поступающая в систему управления в режиме реального времени, должна быть хорошо структурирована, достоверна и актуальна. Подготовка наборов данных для превентивной аналитики является важным этапом в процессе оценки жизнеспособности критических инфраструктур и анализа эффективности композиции средств ее обеспечения в условиях воздействия множественных угроз различной природы. На базе исходной и сформированной аналитической информации для каждой критической функции (точки уязвимости) объекта критической инфраструктуры строится профиль восстановления функциональности объекта и его адаптации к изменениям условий (параметров) функционирования. По аналогии с теорией безопасности этот профиль представляет собой спецификацию защищенности критической инфраструктуры,

которая устанавливает соответствие между уязвимостями критически важных объектов, возможными угрозами, способами воздействия этих угроз и требованиями к поддержанию устойчивости всех функциональных элементов и жизнеспособности критической инфраструктуры в целом.

Формальный аппарат, лежащий в основе базовой методологии управления рисками и сфокусированный на задаче оценки жизнеспособности, оперирует следующими условными обозначениями:  $CI_q, q \in Q$  – критическая инфраструктура, принадлежащая одному из секторов, установленных в нормативных актах<sup>1</sup>;  $CE_o, o \in O$  – функциональные элементы (значимые объекты), образующие критическую инфраструктуру,  $\bigcup CE_o = CI_q$ ;  $V_l \cong CF_l, l \in L$  – критическая функция (точка/область уязвимости) элемента  $CE_o$ ;  $T_k, k \in K$  – потенциальные внешние и внутренние угрозы, воздействующие на объекты  $CE_o$  и являющиеся элементами модели актуальных угроз;  $IM_j, j \in J$  – способы воздействия угроз  $T_k$  на элементы критической инфраструктуры;  $SM_i, i \in I$  – превентивные средства и меры противодействия влиянию деструктивных факторов;  $P_0$  – контролируемые параметры критических функций объектов;  $P_i$  – параметры критических функций объектов, поддерживаемые и регулируемые за счет применения средств и мер противодействия  $SM_i$ , т.е. нормативная функция средств  $SM_i$ ;  $C_{ijk}$  – стоимостная оценка средств и мер противодействия  $SM_i$ , включающая стоимость их создания, внедрения и обслуживания;  $E_{ijk}$  – эффективность применения средств и мер противодействия  $SM_i$  для поддержания нормального функционирования элементов критической инфраструктуры при реализации  $IM_j$  способов воздействия множественных угроз  $T_k$ ;  $h \in H$  – количество однотипных мер и средств противодействия  $SM_i$ , применяемых для поддержания работоспособности и повышения отказоустойчивости критических функций  $CF_l$  объекта при  $IM_j$  способе реализации угрозы  $T_k$ ;  $CMC_{ijk}$  – комбинация совместно используемых разнотипных средств и мер противодействия для поддержания отказоустойчивости критических функций  $CF_l$  объекта при  $IM_j$  способе реализации угрозы  $T_k$ ;  $d$  – количество разнотипных средств и мер противодействия  $SM_i$ , образующих комбинацию  $CMC_{ijk}$ ;  $S_{ijk} = f(E_{ijk})$  – показатель устойчивости (защищенности) элемента критической инфраструктуры при  $IM_j$  способе реализации угрозы  $T_k$ ;  $R_{ijk} = 1 - S_{ijk}$  – жизнеспособность (устойчивость) функционального элемента инфраструктуры, выраженная через риск нарушения его свойств или критических функций вследствие реализации потенциальных угроз.

Методологический подход к решению поставленной в работе проблемы реализуется в два основных этапа, в ходе которых проводится оценка эффективности системы управления жизнеспособностью, определяемая через величину совокупного риска потери устойчивости и функциональности (нарушения выполнения критических функций) системы. На первом этапе определяется эффективность поддержания устойчивости каждой критической функций (области уязвимости) для каждого функционального элемента критической инфраструктуры в условиях реализации каждого вида угроз, воздействующих на нее всеми возможными способами, при использовании управляющей системой заданного множества превентивных мер или композиции средств противодействия нарушению жизнеспособности этого объекта. При этом выявляются наиболее уязвимые критические функции взаимосвязанных элементов критической инфраструктуры и необходимые меры по повышению их устойчивости к воздействию конкретных видов угроз. На втором этапе полученные оценки эффективности комплекса мер и средств обеспечения жизнеспособности каждого элемента критической инфраструктуры по каждой области его уязвимости иерархически агрегируются «снизу-вверх» и на верхнем уровне формируют интегральную оценку эффективности системы управления жизнеспособностью всей инфраструктуры в целом. Физический смысл этого показателя заключается в том, что его значение показывает, насколько управляющая система способна противодействовать потенциально

<sup>1</sup> О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : федер. закон № 187-ФЗ от 26.07.2017. URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201707260023.pdf> ; Директива Совета Европейского Союза 2008/114/EC от 8 декабря 2008 г. «О Европейских критических инфраструктурах и мерах по их защите». URL: <https://base.garant.ru/70333008/> ; Директива Европейского Парламента и Совета Европейского союза 2022/2557 от 14 декабря 2022 г. «Об устойчивости критически важных организаций». URL: <https://base.garant.ru/407633886/>

возможным способам воздействия всех видов угроз на критически важные объекты при используемых защитных средствах и реализуемых превентивных мерах. При этом определяется оптимальная по стоимости и эффективности конфигурация средств управления жизнеспособностью, обеспечивающая заданный уровень устойчивости и защищенности элементов критической инфраструктуры (приемлемый риск потери функциональности и управляемости в условиях реализации множественных угроз).

Такой агрегатный принцип синтеза и анализа систем управления жизнеспособностью обеспечивает возможность рационализировать выбор тех или иных превентивных мер и профилей восстановления для поддержания критических функций всех значимых элементов на каждом уровне организации критической инфраструктуры и, тем самым, определить оптимальную (сбалансированную) конфигурацию средств противодействия потенциальным угрозам потери функциональности, адекватную условиям и режимам функционирования инфраструктурных объектов и влияющим на их устойчивость ситуационным факторам. Преимуществом агрегативного подхода является легкость понимания и относительная простота интерпретации результатов вычислений для предлагаемого метода оценки. В итоге, на основе полученных количественных оценок формируются обоснованные рекомендации по повышению эффективности и совершенствованию систем управления безопасностью и жизнеспособностью критических инфраструктур.

Концептуальная схема методологического подхода к управлению жизнеспособностью критических инфраструктур представлена на рис. 2. На рис. 2 используются следующие обозначения: КВО – критически важный объект; КИ – критическая инфраструктура.

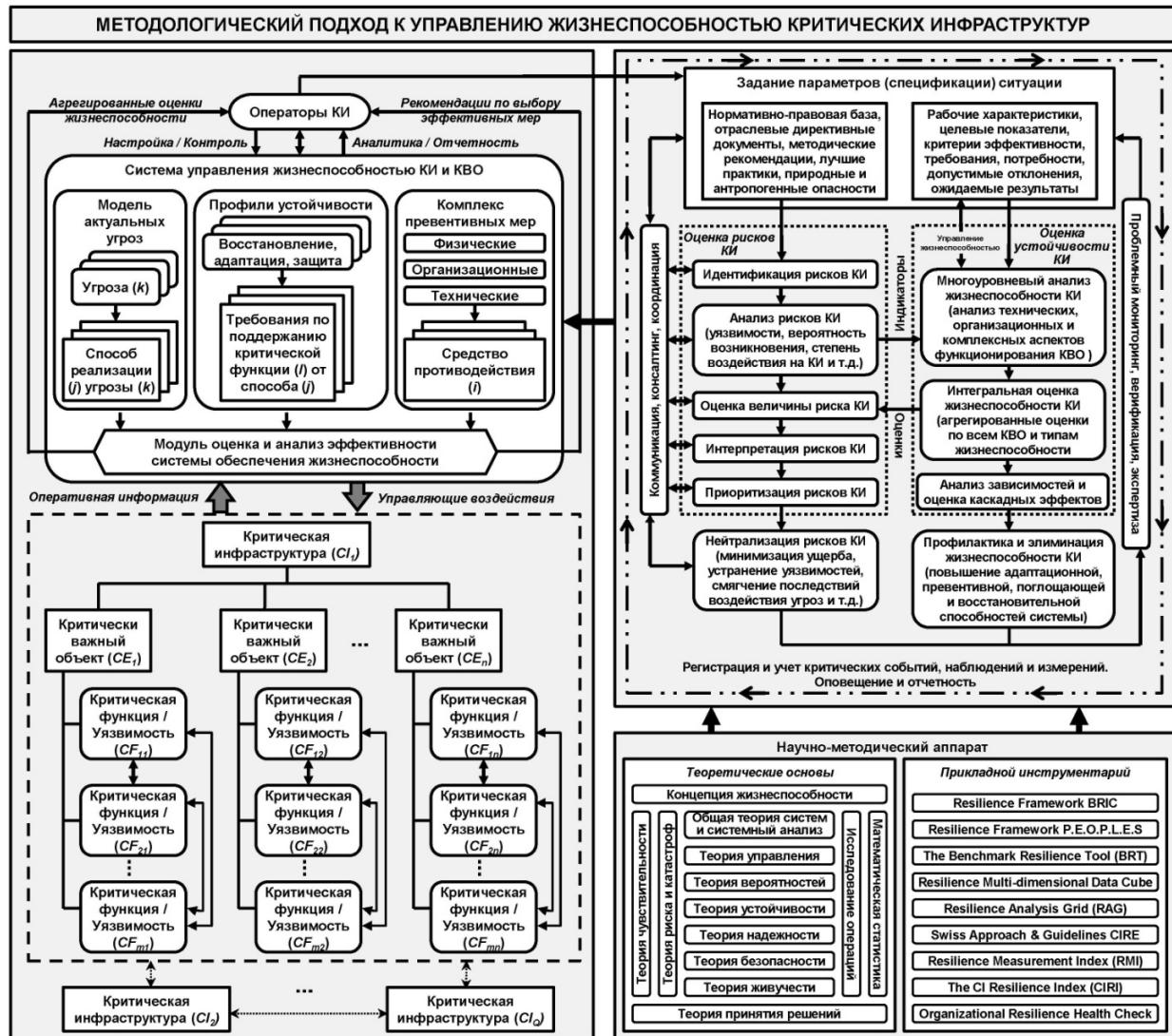


Рис. 2. Концептуальная схема методологического подхода к управлению жизнеспособностью критических инфраструктур

Оценка жизнеспособности критической инфраструктуры, выраженная через величину рисков нарушения критических функций (оценки уязвимостей) функциональных элементов этой инфраструктуры, зависящую от используемого набора превентивных средств адаптации и противодействия потенциальным угрозам, то есть от эффективности системы управления жизнеспособностью, рассчитывается для всех типов жизнеспособности (технологической, организационной, экологической и т.д.) критически важных объектов и, в итоге, обобщается с полученными оценками для всех остальных типов и секторов критических инфраструктур, участвующих в рассмотрении. Эти оценки носят вероятностный характер, что определяется манерой реализации угроз и случайной природой возникновения экстремальных событий.

Согласно базовой методологии [20, 21] оценка риска  $R_{ijk}$  нарушения критических функций элементов критической инфраструктуры рассматривается с позиции теории вероятностей как показатель того, что с вероятностью  $R_{ijk}$  на область уязвимости  $V_l$  элемента  $CE_o$  будет воздействовать угроза  $T_k$  определенного типа, реализуемая способом  $IM_j$ , при использовании комплекса средств и мер противодействия  $SM_i$ . Этот показатель характеризует чувствительность системы управления жизнеспособностью критической инфраструктуры к изменению как способа реализации угроз, так и используемых средств противодействия. Получение точных оценок риска реализации различных видов угроз – непростая задача. Для технических систем она решается на уровне контроля допустимой области изменения рабочих характеристик элементов системы и анализа параметров состояния связанных с ними процессов. Для организационных систем, в которых влияние человеческого фактора повышает уязвимость системы и неопределенность возникновения непредвиденных ситуаций, определение степени риска носит приближенный характер, а полученные приближенные значения служат лишь индикатором потенциальной опасности. В некоторых случаях, например в области кибербезопасности, получить точные оценки риска потери функциональности элементов системы не всегда представляется возможным. Таким образом, целевым показателем устойчивости функционирования  $S_{ijk}$  элемента критической инфраструктуры является характеристика эффективности комплекса превентивных мер, которая показывает, с какой вероятностью используемые средства противодействия  $SM_i$  обеспечат отказоустойчивость критических функций элемента при заданном способе реализации  $IM_j$  угрозы  $T_k$ . Данный показатель должен учитывать стоимостные оценки  $C_{ijk}$  создания и применения на практике адекватных средств и мер противодействия  $SM_i$  вероятным угрозам в системе управления жизнеспособностью критических инфраструктур.

Далее рассмотрим подробнее содержание этапов реализации развиваемой базовой методологии обеспечения безопасности, адаптированной к управлению жизнеспособностью. На рис. 3 схематично показана структура основной циклической процедуры вычисления показателей устойчивости критически важных объектов и сопутствующего процесса анализа эффективности комплекса используемых средств в системе управления жизнеспособностью критической инфраструктуры. На рис. 3 введены следующие обозначения: СУЖКИ – система управления жизнеспособностью критической инфраструктуры;  $S_g$  – заданный (допустимый) уровень отказоустойчивости критических функций значимых объектов инфраструктуры.

На первом этапе в соответствии с результатами [2, 21] выполняется следующая последовательность вычислительных процедур, образующих основную процесс оценки риска нарушения нормального функционирования элементов критической инфраструктуры:

1. На основе ретроспективных и оперативных данных, в том числе сформированной аналитической информации:

- строится модель угроз для каждого элемента критической инфраструктуры, т.е. структурированное представление потенциальных опасностей, которые могут негативно повлиять на жизнеспособность элементов критической инфраструктуры, их свойств и характеристик, таких как риски реализации (вероятности возникновения), возможные последствия и уязвимости элементов;

- определяются все критические функции  $V_l \equiv CF_l, l \in L$  для всех элементов критической инфраструктуры  $CE_o, o \in O$  и способы  $IM_j$  реализации каждой угрозы  $T_k$  по каждой точке/области уязвимости;

- формируются профили восстановления и адаптации для поддержания отказоустойчивости каждой критической функции  $CF_l$  элемента, т.е. определяются нормативная функция элемента и требования по парированию способа реализации  $IM_j$  угрозы  $T_k$ ;

– дается детальная характеристика всех используемых средств и мер противодействия  $CM_i$  потенциальным угрозам  $T_k$  с распределением по критическим функциям  $CF_i$  элементов, т.е. задается конфигурация (структура и состав) применяемой системы управления жизнеспособностью критической инфраструктуры;

– определяются целевые и проектные показатели типов жизнеспособности, по которым проводится оценка устойчивости элементов критической инфраструктуры и всей системы в целом.

Исходные данные для последующей оценки, как правило, представляется в табличной форме по каждому функциональному элементу критической инфраструктуры.

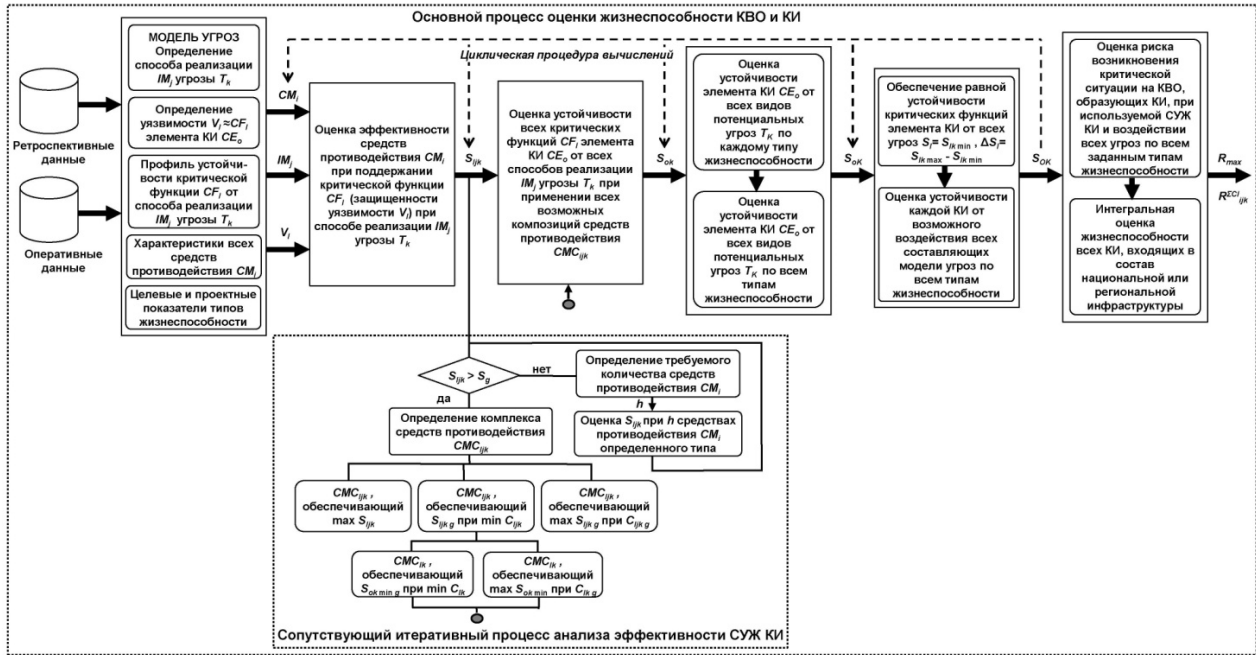


Рис. 3. Этапы процесса оценки жизнеспособности критических инфраструктур на основе адаптированной методологии анализа рисков и обеспечения безопасности

2. Оценка эффективности средств и мер противодействия  $CM_i$ , обеспечивающих поддержание отказоустойчивости критической функции  $CF_i$  при реализации способа воздействия  $IM_j$  угрозы  $T_k$  для каждого элемента критической инфраструктуры  $CE_o$ .

Для элементарной ситуации, когда используется одно средство противодействия для одного способа реализации угрозы по одной критической функции, оценка эффективности вычисляется по формуле

$$S_{ijk} = E_{ijk}, \quad (1)$$

где  $E_{ijk}$  – эффективность средств противодействия конкретному способу реализации угрозы, то есть эффективность средства противодействия  $CM_i$  реализации способа  $IM_j$  угрозы  $T_k$  на точку уязвимости (критическую функцию)  $CF_i$ . Показатель  $E_{ijk}$  может быть интерпретирован как вероятность того, что данный способ реализации угрозы будет нейтрализован, либо последствия воздействия угрозы не приведут к существенной потере функциональности элементов критической инфраструктуры.

Агрегированная оценка для множества элементарных ситуаций имеет вид

$$S_{ijk} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - S_{ijk}) \cdot h. \quad (2)$$

Если в системе управления жизнеспособностью используется  $h$  однотипных мер и средств противодействия  $CM_i$ , то для вычислений используется формула

$$S_{ijk} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - S_{ijk}^1) \cdot h \dots, \quad (3)$$

где  $S_{ijk}^1$  – эффективность одного средства противодействия  $CM_i$ .

Если же в системе управления жизнеспособностью критических инфраструктур используется комбинация  $CMC_{ijk}$  различных средств и мер противодействия, направленных на поддержание нормативных значений критических функций  $CF_i$  в условиях воздействия угроз  $T_k$ , реализуемых способом  $IM_j$ , то используются аналогичные (1) и (3) формулы расчета

$$S_{ijk} = E_{ijk}, S_{ijk} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - S_{ijk}^1) \cdot d \dots. \quad (4)$$

Полученные значения эффективности проверяются на их соответствие требованиям, заданным в профиле устойчивости элемента критической инфраструктуры. Например, если требования определяют допустимую степень устойчивости объекта равную 0,98, а расчетное значение эффективности составляет 0,85, то применяемые меры и средства противодействия являются недостаточными и требуют либо диверсификации, либо дублирования, либо применения новой комбинации, т.е. необходим выбор и реализация иной конфигурации мер по обеспечению отказоустойчивости критических функций инфраструктурных объектов.

Таким образом, на выходе этой процедуры для каждого элемента критической инфраструктуры получаем оценки отказоустойчивости  $S_{ijk}$  каждой из его критических функций  $CF_i$  в условиях реализации определенного способа воздействия  $IM_j$  угрозы  $T_k$  при использовании как  $h$  однотипных, так и  $d$  различных средств и мер противодействия  $CM_i$ , а также их текущей комбинации  $CMC_{ijk}$  по каждому  $IM_j$  способу реализации угрозы  $T_k$ .

3. Оценка отказоустойчивости всех критических функций  $CF_i$  элемента критической инфраструктуры от всех способов реализации  $IM_j$  угрозы  $T_k$  при применении всех возможных комбинаций средств и мер противодействия  $CMC_{ijk}$  путем агрегации всех ранее вычисленных по формулам (3) и (4) оценок  $S_{ijk}$ . На выходе этой процедуры определяется степень отказоустойчивости  $S_{ok}$  критических функций объекта инфраструктуры при воздействии на их уязвимые параметры угрозы  $T_k$ .

4. Оценка устойчивости элемента критической инфраструктуры  $CE_o$  от всех видов потенциальных угроз  $T_k$  по каждому типу жизнеспособности в отдельности, а затем по всем типам жизнеспособности в целом. Вычисления проводятся по формулам (3) и (4) с использованием всех полученных ранее оценок  $S_{ok}$ . На выходе данной процедуры получаем агрегированную оценку  $S_{ok} (S_o)$ , характеризующую защищенность и жизнеспособность элемента критической инфраструктуры при воздействии на его критические функции всех видов угроз  $T_k$ , реализуемых всеми возможными способами.

5. Обеспечение равнозначной отказоустойчивости критических функций объектов инфраструктуры от всех видов угроз и оценка жизнеспособности каждой критической инфраструктуры при воздействии на нее всех составляющих модели угроз по всем типам жизнеспособности, то есть показатель  $S_{ok}$  рассчитывается путем агрегации всех ранее полученных оценок  $S_{ok} (S_o)$  для всех элементов критической инфраструктуры  $CE_o$ . Для этого также применяются формулы (3) и (4).

6. Оценка риска возникновения неблагоприятных событий на объектах критической инфраструктуры при использовании действующей системы управления жизнеспособностью и воздействием всех возможных видов угроз по всем заданным типам жизнеспособности. Совокупный риск (оценка уязвимости всех критических функций объектов инфраструктуры) вычисляется по формуле

$$R_{\max} = 1 - S_{lk \min}. \quad (5)$$

Интегральная средневзвешенная оценка рисков жизнеспособности всех критических инфраструктур, участвующих в рассмотрении и входящих в состав национальной или региональной инфраструктуры, может быть рассчитана по формуле

$$R_{ijk}^{\Sigma CI} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \omega_q R_{q \max}, \quad \sum_{q=1}^Q \omega_q = 1, \quad (6)$$

где  $\omega_q$  – нормированные весовые коэффициенты важности, определяемые экспертным путем.

На втором этапе в соответствии с положениями, изложенными в работах [2, 14], выполняется следующая последовательность расчетных операций, образующих сопутствующий процесс анализа эффективности конфигурации систем управления жизнеспособностью критических инфраструктур с целью их совершенствования и модернизации:

1. Определение необходимого количества  $h$  однотипных средств противодействия  $CM_i$  для повышения отказоустойчивости и адаптивности критических функций  $CF_i$  элемента критической инфраструктуры  $CE_o$  при реализации способа воздействия  $IM_j$  угрозы  $T_k$ . Количество  $h$  однотипных средств противодействия  $CM_i$  вычисляется по формуле

$$h \geq \frac{P_0}{P_i}. \quad (7)$$

В этом случае эффективность применяемых защитных мер определяется как функция

$$S_{ijk} = f(E_{ijk}, h).$$

2. Определение комбинации средств противодействия  $CMC_{ijk}$ , обеспечивающей при реализации способа воздействия  $IM_j$  угрозы  $T_k$  для всех критических функций  $CF_i$  элемента критической инфраструктуры:

- $\max S_{ijk}$  – максимальный уровень отказоустойчивости;
- $S_{ijk g}$  – заданный уровень отказоустойчивости при минимальных затратах на реализацию превентивных и защитных мер;
- $\max S_{ijk g}$  – максимальный уровень отказоустойчивости при заданных затратах  $C_{ijk g}$  на создание, внедрение и обслуживание средств противодействия потенциальным угрозам.

Самостоятельной задачей, требующей отдельного рассмотрения, является задача приоритизации средств и мер противодействия, выбор и использование которых должно обеспечить повышение отказоустойчивости критических функций объектов инфраструктуры при ограниченных финансовых и временных ресурсах на проведение модернизации системы управления жизнеспособностью. В данном конкретном случае речь идет о необходимости решения задачи оптимизации конфигурации средств противодействия актуальным угрозам. В работе [14] для этих целей предложено использовать известный метод прямого перебора, который, несмотря на свои ограничения, позволяет получить удовлетворительный результат.

В первой постановке  $\max S_{ijk}$  определяется предел возможностей конкретного набора средств противодействия  $CM_i$ , который вычисляется через максимальные возможности  $S_{\lim \max}$  каждого средства противодействия  $CM_i$  в рамках принятых ограничений. Соответствующая  $\max S_{ijk}$  комбинации  $CMC_{ijk}$  определяется с помощью зависимости  $S_{ijk}$  от  $h$ , для всех  $i \in I$  по формулам (3) и (4).

Максимальная отказоустойчивость критических функций объекта инфраструктуры может рассматриваться в качестве критерия эффективности конфигурации и вычисляется по формуле

$$\max S_{ijk} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - S_{\lim \max}). \quad (8)$$

Критерием эффективности конфигурации средств  $CMC_{ijk}$  во второй постановке  $S_{ijk g}$  является ее общая стоимость  $C_{ijk}$ :

$$C_{ijk} = \min \sum_{i=1}^I C_{li} \cdot h_i, \quad (9)$$

определяемая путем минимизации нижеследующего выражения по суммарной стоимости средств противодействия:

$$\min \prod_{i=1}^I [1 - S_{li}(C_{li} \cdot h_i)] = 1 - S_{ljk\ g} . \quad (10)$$

Функция  $S_{li}(C_{li} \cdot h_i)$  может быть получена путем умножения значений функции  $S_{li}(h_i)$  на стоимость одного средства противодействия  $CM_i$  при условии, что  $C_i = const$ , то есть не зависит от величины  $h_i$ .

Критерием эффективности конфигурации средств противодействия  $CMC_{ljk}$  в третьей постановке  $\max S_{ljk\ g}$  выступает степень отказоустойчивости критических функций объекта инфраструктуры  $S_{ljk}$ , максимальное значение которой определяется оптимизацией выражения

$$\max S_{ljk} = 1 - \min \prod_{i=1}^I [1 - S_{li}(C_{li} \cdot h_i)] \quad (11)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^I C_{li} \leq C_{ljk\ g} . \quad (12)$$

3. Определение минимально допустимого значения показателя устойчивости  $S_{ok\ min}$  функционального элемента  $CE_o$  критической инфраструктуры при воздействии угрозы  $T_k$ , обеспечиваемого эффективностью конфигурации  $CMC_{ljk}$  в рамках следующих постановок:

– конфигурация средств и мер противодействия  $CMC_{lk} = \{CMC_{ljk}\}$ , отвечающая заданному уровню отказоустойчивости элемента  $S_{ok\ min\ g}$  и обеспечивающая ее минимальную стоимость

$$C_{lk} = \min \sum_{j=1}^J C_{ljk} \text{ или } \min \Delta S_{ok} ;$$

– конфигурация средств и мер противодействия  $CMC_{lk} = \{CMC_{ljk}\}$ , обеспечивающая  $\max S_{ok\ min}$  при заданной стоимости  $C_{lk} = C_{lk\ g}$  или  $\min \Delta S_{lk}$ .

На этой стадии также решается задача выбора и оптимизации конфигурации набора средств и мер противодействия для обеспечения жизнеспособности элементов критической инфраструктуры в целом при заданных затратах на реализацию данной конфигурации. Различные конфигурации средств противодействия действуют параллельно друг с другом, выполняя каждое свою защитную функцию. При этом в разных конфигурациях могут быть задействованы как общие, так и специфичные для каждой конкретной ситуации средства противодействия потенциальным угрозам. Кроме того, на этой стадии обеспечивается равнозначная отказоустойчивость критических функций объектов инфраструктуры при всех возможных способах реализации угрозы. Во введенных выше терминах это означает, что устойчивость  $S_{ok}$  функционального элемента критической инфраструктуры при воздействии на него угрозы  $T_k$  определяется эффективностью конфигурации  $CMC_{ljk}$ , обеспечивающей минимальную гарантированную способность элемента к самосохранению своих функций и сопротивлению активной угрозе среди всех  $j$ -х конфигураций средств противодействия  $CMC_{lk} = \{CMC_{ljk}\}$  при реализации угрозы  $T_k$ . Другими словами, эффективность защитных мер и нормативных функций элемента критической инфраструктуры равна эффективности наиболее слабой конфигурации из всех входящих в  $\{CMC_{ljk}\}$ . Соответственно,

$$\forall j \in J, S_{lk} = S_{ljk\ min} \subseteq \{S_{ljk}\} , \quad (13)$$

где  $\{S_{ljk}\}$  – множество оценок эффективности конфигураций средств противодействия  $CMC_{lk}$ , применяемых для парирования или смягчения негативного воздействия угрозы  $T_k$ .

Другой важной характеристикой эффективности средств противодействия является разность  $\Delta S_{lk}$  между минимальной и максимальной отказоустойчивостью функций элемента критической инфраструктуры из множества конфигураций  $CMC_{lk} = \{CMC_{ljk}\}$ :

$$\forall jk \in JK, \Delta S_{lk} = S_{ljk \max} - S_{ljk \min} \subseteq \{S_{ljk}\}. \quad (14)$$

Показатель качества  $\Delta S_{lk}$  характеризует степень рационального использования сил и средств для обеспечения жизнеспособности элементов критической инфраструктуры и адекватность применяемой конфигурации средств противодействия актуальным угрозам.

4. Обеспечение равнозначной отказоустойчивости критических функций элемента критической инфраструктуры от всех видов угроз. Это положение требует, чтобы критерий эффективности  $S_l$  средств противодействия для функционального элемента  $CE_o$  был равен минимальной отказоустойчивости  $S_{lk \min}$  из множества  $\{S_{lk}\}$ :

$$\forall jkl \in JKL, S_l = S_{lk \min} \subseteq \{S_{lk}\} = S_{ljk \min} \subseteq \{S_{ljk}\}, \quad (15)$$

а показатель качества:

$$\forall ljk \in LJK, \Delta S_l = S_{ljk \max} - S_{ljk \min} \subseteq \{S_{ljk}\}. \quad (16)$$

Последовательное выполнение перечисленных выше процедур обеспечивает решение задач оценки и анализа жизнеспособности критических инфраструктур как на объектовом уровне управления (для отдельно взятых критически важных объектов), так и на системном уровне (региональная критическая инфраструктура) в целом.

Результаты вычислений, полученные на основе применения предложенного подхода к оценке жизнеспособности критических инфраструктур, наглядно и удобно представлять в виде радарной диаграммы или диаграммы Ганта [21, 26]. При изображении целесообразно введение нескольких областей оценки полученных результатов. Например, области значений эффективности 0–0,25 (красная зона); 0,26–0,5 (оранжевая зона); 0,56–0,75 (желтая зона) и 0,76 и выше (зеленая зона). Соответственно, к первой области значений оценки относятся наиболее уязвимые критические функции инфраструктурных объектов и малоэффективные средства противодействия угрозам, далее – более устойчивые, адаптируемые, защищенные и эффективные и т.д. Такая индикация позволяет операторам критических инфраструктур наглядно представлять себе всю картину происходящих событий на контролируемых объектах в целом и сфокусировать внимание на наиболее узких местах при ситуационном управлении жизнеспособностью и безопасностью критически важных объектов [2, 12, 22].

Апробирование описанной методологии планируется осуществлять на задачах оценки устойчивости объектов горной промышленности, размещенных на территории Мурманской области и являющихся значимыми элементами оборонно-промышленного комплекса страны. По результатам апробации можно будет говорить о необходимости программной реализации предлагаемой методологии и возможности встраивания в комплекс программно-технических средств ситуационных центров как инструмента превентивной аналитики для управления жизнеспособностью критически важных объектов и инфраструктур.

Таким образом, интегральная оценка жизнеспособности критической инфраструктуры с применением рассмотренной методологии может быть получена как на уровне отдельных элементов инфраструктуры (комплексная оценка), так и на уровне характеристик и типов жизнеспособности элемента критической инфраструктуры (частичная оценка), а также на уровне детализированных параметров компонентов жизнеспособности, специфичных для данного элемента критической инфраструктуры (элементарная оценка). Такой общий подход к оценке жизнеспособности критических инфраструктур обеспечивает «сквозное выявление» их системных уязвимостей, и формирование превентивных мер по повышению стабильности и эффективности функционирования инфраструктурных объектов на всех этапах жизненного цикла жизнеспособности в условиях действия множественных угроз различной природы.

### Заключение

Нерешенность ряда проблем, возникающих при переходе от традиционного подхода к обеспечению безопасности критически важных объектов к современной модели управления жизнеспособностью критических инфраструктур и связанных с дефицитом методического и научного обеспечения (сопровождения) этого процесса, требуют адаптации существующих и разработки новых методов и средств поддержания риск-устойчивого функционирования критически важных объектов и оценки эффективности превентивных мер по восстановлению работоспособности критических инфраструктур в условиях деструктивных воздействий. Это создает предпосылки для интеграции теоретических основ риск-менеджмента безопасности и концепции жизнеспособности сложных систем, то есть для развития науки о безопасности в контексте современной теории жизнеспособности. В этом перспективном направлении получены следующие результаты:

1. В общем виде сформулирована и конкретизирована проблема необходимости повышения эффективности управления риск-устойчивым функционированием критически важных объектов и инфраструктур в условиях трансформации целеполагания в методологии обеспечения безопасности, обусловленной смещением акцентов в плоскость стратегического управления жизнеспособностью значимых инфраструктурных систем.

2. Установлено, что решение проблемы в условиях развития цифровой экономики во многом осложняется наличием множества статичных и динамичных факторов, создающих высокую неопределенность в управлении жизнеспособностью критических инфраструктур и риски при эксплуатации систем обеспечения их безопасности, а также препятствующих эффективному применению известных в мировой практике методов и средств, фактически не позволяющих получить комплексное гарантированное решение проблемы по поддержанию жизнеспособности критически важных объектов в условиях воздействия любых видов угроз традиционными способами. Для удовлетворения потребностей науки и практики управления жизнеспособностью критических инфраструктур эти неопределенности должны быть учтены и разрешены, в частности, при проектировании новых и совершенствовании существующих систем и средств обеспечения комплексной безопасности и жизнеспособности критически важных объектов, отвечающих требованиям надежности, экономической и функциональной эффективности, технической и организационной реализуемости. К этим влияющим факторам относятся: взаимозависимость критических инфраструктур и множественность взаимосвязей между объектами, образующими эти инфраструктуры; динамичность элементного состава и характеристик критических инфраструктур; масштабность и постоянное усложнение критических инфраструктур, как объекта управления, с точки зрения многоаспектностью протекающих в них процессов и охвата различных сфер жизнедеятельности; многообразие видов и способов реализации внешних и внутренних угроз, латентный характер их проявления и воздействия при различных режимах функционирования критических инфраструктур; тенденция к появлению новых уязвимостей и их видовое разнообразие, включая человеческий фактор; увеличение количества чрезвычайных ситуаций на критически важных объектах и сценариев развития неблагоприятных событий; непрерывный рост объемов разноплановой информации, требующей оперативного сбора, обработки и анализа для поддержки принятия управленческих решений по обеспечению безопасности и жизнеспособности критических инфраструктур, а также зачастую характеризующейся неполнотой, неструктурированностью и нерелевантностью; ускоренный темп расширения спектра превентивных мер и средств противодействия потенциальным угрозам, не всегда согласующихся друг с другом, комплементарных и адекватных реальным потребностям; трудоемкость корректировки прогнозов и субъективизма управленческой деятельности в условиях возникновения нештатных ситуаций на критически важных объектах из-за несвоевременности поступления оперативной информации, необходимой для принятия решений в ограниченное время, и/или ее недостоверности; организационная разнородность операторов критических инфраструктур и сложность координации взаимодействия между ними из-за наличия противоречий на регулятивном уровне и недостаточного нормативного обеспечения.

3. Предложено расширение теоретического аппарата и области применения риск-ориентированной методологии обеспечения безопасности критически важных объектов к управлению устойчивостью критических инфраструктур в части адаптации и интеграции методов риск-менеджмента безопасности и управления жизнеспособностью сложных систем.

4. Для решения задач управления жизнеспособностью критических инфраструктур адаптирован методический подход к комплексной оценке рисков нарушения безопасности критически важных объектов, основанный на многоуровневом анализе модели актуальных угроз и эффективности

средств (мер) противодействия деструктивным воздействиям, а также обеспечивающий возможность определения уровня жизнеспособности системы через оценки ее уязвимостей, агрегированные по всем взаимосвязанным функциональным элементам, и рационального выбора профиля восстановления и адаптации критических функций системы при заданном виде действующих угроз.

Дальнейшие исследования будут направлены на операционализацию и верификацию адаптированной методологии на практике, а также на ее программную реализацию в составе комплекса средств поддержки принятия решений ситуационных центров с целью повышения эффективности информационно-аналитического обеспечения управленческой деятельности операторов критических инфраструктур и, тем самым, качества управления безопасностью и жизнеспособностью значимых инфраструктурных объектов.

### Список литературы

1. Pesch-Cronin K. A., Marion N. E. Critical Infrastructure Protection, Risk Management, and Resilience: A Policy Perspective. New York : Routledge, 2024. 278 p.
2. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С., Смолян Г. Л. Безопасность критических инфраструктур. М. : УРСС, 2019. 200 с.
3. Critical Infrastructure Security and Resilience: Theories, Methods, Tools and Technologies // Advanced Sciences and Technologies for Security Applications / ed. by D. Gritzalis, M. Theoharidou, G. Stergiopoulos. Springer Cham, Springer Nature Switzerland AG, 2019. 313 p.
4. Melkunaite L. [et al.]. International Survey // IMPROVER Project Report: Deliverable 1.1. 2016. 343 p.
5. Маслобоев А. В., Быстров В. В. Концептуальная модель жизнеспособности критических инфраструктур в контексте современной теории безопасности сложных систем // Экономика. Информатика. 2020. Т. 47, № 3. С. 555–572.
6. Masloboev A. V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience // Reliability and quality of complex systems. 2020. № 4. P. 115–130.
7. Rød B., Lange D., Theoharidou M., Pursiainen C. From risk management to resilience management in critical infrastructure // Management in Engineering. 2020. № 36. P. 04020039.
8. Reitan N. K. et al. Evaluation of resilience concepts applied to critical infrastructure using existing methodologies // IMPROVER Project Report: Deliverable 2.3. 2016. 97 p.
9. Маслобоев А. В. Обобщенная методология построения мультиагентных систем управления жизнеспособностью критических инфраструктур // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 134–146.
10. Holling C. S. Resilience and stability of ecological systems // Annual Review of Ecology and Systematics. 1973. № 4. P. 1–23.
11. Маслобоев А. В. Формальные модели жизнеспособности региональных критических инфраструктур // Труды ИСА РАН. 2022. Т. 72, № 3. С. 59–80.
12. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 568 с.
13. Masloboev A. V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations. Part 2. Resilience capacity models and backbone capabilities // Reliability and quality of complex systems. 2024. № 3 (47) P. 130–156.
14. Masloboev A. V., Tsygichko V. N. A method for efficiency assessment of multi-level distributed system for regional security support // Reliability and quality of complex systems. 2021. № 1. P. 129–143.
15. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/J8FhckYOPAQQfxN6Xlt6ti6XzpT-VAvQy.pdf>.
16. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года. URL: <http://www.scrf.gov.ru/media/files/file/W5JeWAnrAypIMIMHXFRXEmQwLOUfoesZ.pdf>
17. Pursiainen C. Russia's Critical Infrastructure Policy: What do we know about it? // European Journal for Security Research. 2021. Vol. 6. P. 21–38.
18. Pursiainen C., Kytömaa E. From European critical infrastructure protection to the resilience of European critical entities: what does it mean? // Sustainable and Resilient Infrastructure. 2023. Vol. 8, iss. sup1. P. 85–101.
19. Presidential Policy Directive 21: Critical Infrastructure Security and Resilience (February 12, 2013). URL: [https://www.cisa.gov/sites/default/files/2023-01/ppd-21-critical-infrastructure-and-resilience-508\\_0.pdf](https://www.cisa.gov/sites/default/files/2023-01/ppd-21-critical-infrastructure-and-resilience-508_0.pdf)
20. Черешкин Д. С., Кононов А. А., Новицкий Е. Г., Цыгичко В. Н. Методика оценки рисков нарушения информационной безопасности в автоматизированных информационных системах : препринт. М. : ИСА РАН, 1999. 37 с.
21. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С. Безопасность критически важных объектов транспортного комплекса. Saarbrücken Deutschland : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 224 с.

22. Кононов А. А., Стилиславский А. Б., Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С. Автоматизированный комплекс средств обеспечения антитеррористической безопасности на примере транспортного комплекса // Труды СПИИРАН. 2009. Вып. 10. С. 47–62.
23. Saxena S., Mahan K. Establishing Global Norms to Protect Critical Information Infrastructure // Observer Research Foundation. Chase India, New Delhi, India, 2023. 18 p.
24. Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Lovecek T. Complex Approach to Assessing Resilience of Critical Infrastructure Elements // International Journal of Critical Infrastructure Protection. 2019. Vol. 25. P. 125–138.
25. Report of criteria for evaluating resilience // IMPROVER Project Report: Deliverable 2.2 / ed. by C. Pursiainen, B. Rød. 2016. 37 p.
26. Гурлев И. В., Маслобоев А. В., Малыгин И. Г. Ситуационная осведомленность о состоянии портов северного морского транспортного коридора в управлении экологической безопасностью Арктики // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 120–134.

## References

1. Pesch-Cronin K.A., Marion N.E. *Critical Infrastructure Protection, Risk Management, and Resilience: A Policy Perspective*. New York: Routledge, 2024:278.
2. Tsygichko V.N., Chereshekin D.S., Smolyan G.L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur = Safety of critical infrastructures*. Moscow: URSS, 2019:200. (In Russ.)
3. Critical Infrastructure Security and Resilience: Theories, Methods, Tools and Technologies. *Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*. Ed. by D. Gritzalis, M. Theodoridou, G. Stergiopoulos. Springer Cham, Springer Nature Switzerland AG, 2019:313.
4. Melkunaite L. et al. International Survey. *IMPROVER Project Report: Deliverable 1.1*. 2016:343.
5. Masloboev A.V., Bystrov V.V. A conceptual model of the viability of critical infrastructures in the context of modern security theory of complex systems. *Ekonomika. Informatika = Economy. Computer science*. 2020;47(3):555–572. (In Russ.)
6. Masloboev A.V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience. *Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):115–130.
7. Rød B., Lange D., Theodoridou M., Pursiainen C. From risk management to resilience management in critical infrastructure. *Management in Engineering*. 2020;(36):04020039.
8. Reitan N.K. et al. Evaluation of resilience concepts applied to critical infrastructure using existing methodologies. *IMPROVER Project Report: Deliverable 2.3*. 2016:97.
9. Masloboev A.V. Generalized methodology for building multi-agent systems for managing the viability of critical infrastructures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):134–146. (In Russ.)
10. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973;(4):1–23.
11. Masloboev A.V. Formal models of the viability of regional critical infrastructures. *Trudy ISA RAN = Proceedings of the ISA RAS*. 2022;72(3):59–80. (In Russ.)
12. Severtsev N.A., Yurkov N.K. *Bezopasnost' dinamicheskikh sistem na etapakh zhiznennogo tsikla = Safety of dynamic systems at the stages of the life cycle*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:568. (In Russ.)
13. Masloboev A.V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations. Part 2. Resilience capacity models and backbone capabilities. *Reliability and quality of complex systems*. 2024;(3):130–156.
14. Masloboev A.V., Tsygichko V.N. A method for efficiency assessment of multi-level distributed system for regional security support. *Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):129–143.
15. *Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i obespecheniya natsional'noy bezopasnosti na period do 2035 goda = Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035*. (In Russ.). Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/J8FhckYOPAQQfxN6Xlt6ti6XzpTVAvQy.pdf>.
16. *Osnovy gosudarstvennoy politiki Rossiyskoy Federatsii v Arktike na period do 2035 goda = Fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2035*. (In Russ.). Available at: <http://www.scrf.gov.ru/media/files/file/W5JeWAnrAypMIMHXFRXEmQwLOUfoesZ.pdf>
17. Pursiainen C. Russia's Critical Infrastructure Policy: What do we know about it? *European Journal for Security Research*. 2021;6:21–38.
18. Pursiainen C., Kytömaa E. From European critical infrastructure protection to the resilience of European critical entities: what does it mean? *Sustainable and Resilient Infrastructure*. 2023;8(1):85–101.
19. *Presidential Policy Directive 21: Critical Infrastructure Security and Resilience (February 12, 2013)*. Available at: [https://www.cisa.gov/sites/default/files/2023-01/ppd-21-critical-infrastructure-and-resilience-508\\_0.pdf](https://www.cisa.gov/sites/default/files/2023-01/ppd-21-critical-infrastructure-and-resilience-508_0.pdf)
20. Chereshekin D.S., Kononov A.A., Novitskiy E.G., Tsygichko V.N. *Metodika otsenki riskov narusheniya informatsionnoy bezopasnosti v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh: preprint = Methodology for*

*assessing the risks of information security violations in automated information systems : preprint.* Moscow: ISARAN, 1999:37. (In Russ.)

21. Tsygichko V.N., Chereskin D.S. *Bezopasnost' kriticheski vazhnykh ob"ektov transportnogo kompleksa = Safety of critically important facilities of the transport complex.* Saarbrücken Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014:224. (In Russ.)
22. Kononov A.A., Stislavskiy A.B., Tsygichko V.N., Chereskin D.S. An automated set of anti-terrorist security equipment using the example of a transport complex. *Trudy SPIIRAN = Proceedings of SPIIRAN.* 2009;(10):47–62. (In Russ.)
23. Saxena S., Mahan K. Establishing Global Norms to Protect Critical Information Infrastructure. *Observer Research Foundation.* Chase India, New Delhi, India, 2023:18.
24. Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Lovecek T. Complex Approach to Assessing Resilience of Critical Infrastructure Elements. *International Journal of Critical Infrastructure Protection.* 2019;25:125–138.
25. Report of criteria for evaluating resilience. *IMPROVER Project Report: Deliverable 2.2.* Ed. by C. Pursiainen, B. Rød. 2016:37.
26. Gurlev I.V., Masloboev A.V., Malygin I.G. Situational awareness of the state of the ports of the Northern sea transport corridor in the management of environmental safety in the Arctic. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(4):120–134. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
информационных технологий управления  
техногенно-природными системами,  
Институт информатики и математического  
моделирования имени В. А. Путилова  
Федерального исследовательского центра «Кольский  
научный центр Российской академии наук»;  
главный научный сотрудник,  
Институт проблем промышленной экологии Севера  
Федерального исследовательского центра «Кольский  
научный центр Российской академии наук»  
(Россия, Мурманская область, г. Апатиты,  
ул. Ферсмана, 14)  
E-mail: masloboev@iimm.ru

#### Виталий Николаевич Цыгичко

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
Институт системного анализа  
Федерального исследовательского центра  
«Информатика и управление»  
Российской академии наук  
(Россия, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9)  
E-mail: vtsygichko@inbox.ru

#### Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,  
leading researcher of the laboratory of information  
technologies for industrial-natural system  
management,  
Putilov Institute for Informatics and Mathematical  
Modeling of the Federal Research Center "Kola  
Science Center of the Russian Academy of Sciences";  
chief researcher,  
Institute of North Industrial Ecology Problems  
of the Federal Research Center "Kola Science Center  
of the Russian Academy of Sciences"  
(14 Fersmana street, Apatity, Murmansk region,  
Russia)

#### Vitaliy N. Tsygichko

Doctor of technical sciences, professor, chief researcher,  
Institute for System Analysis of the Federal Research  
Center «Computer Science and Control»  
of the Russian Academy of Sciences  
(9 60-letiya Oktyabrya avenue, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 10.09.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 11.10.2024**

**Принята к публикации/Accepted 23.10.2024**

## АРХИТЕКТУРА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЯДРА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

И. Е. Старостин<sup>1</sup>, С. И. Гавриленков<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия  
<sup>1</sup> starostinigo@yandex.ru, <sup>2</sup> gavrilencov@mstuca

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Основой решения практических задач современной технологии являются математические модели объектов, в которых протекают процессы различной физической и химической природы. Основными требованиями к математическим моделям являются точность и адекватность – непротиворечивость физическим и химическим законам. В общем случае для построения таких моделей систем авторами был предложен в рамках механики, электродинамики и современной неравновесной термодинамики метод математического прототипирования энергетических процессов. Соответственно, модели физических и химических процессов различной природы, даваемые упомянутым методом, не противоречат общим физическим законам (законам термодинамики, механики и электродинамики), а также физическим особенностям рассматриваемой системы. Однако для численной реализации упомянутых математических моделей необходимы данные испытаний объектов. Так как с учетом процессов старения, протекающих в объекте, изменяются его свойства, то возникает необходимость непрерывного мониторинга его состояния, который может быть осуществлен путем непрерывной обработки данных его измеряемых параметров. Это и обуславливает необходимость использования цифровых двойников рассматриваемого объекта, причем в основу математического ядра упомянутых цифровых двойников положен метод математического прототипирования энергетических процессов. Архитектуре математического ядра таких цифровых двойников посвящена настоящая работа. *Материалы и методы.* Синтез уравнений динамики физических и химических процессов осуществляется на базе метода математического прототипирования энергетических процессов. Аналитическое решение уравнений динамики системы строится специальными методами интегрирования систем дифференциальных уравнений. На основе упомянутого аналитического решения строится модель системы для решения практических задач. *Результаты.* Предложенная архитектура математического ядра цифровых двойников различных физико-химических систем на базе метода математического прототипирования позволяет более точно диагностировать и прогнозировать состояние таких систем. *Выводы.* Предлагаемая архитектура математического ядра цифровых двойников систем различной физической и химической природы является единым подходом построения математического ядра цифровых двойников упомянутых систем различной природы.

**Ключевые слова:** метод математического прототипирования энергетических процессов, математическое моделирование, цифровые двойники

**Для цитирования:** Старостин И. Е., Гавриленков С. И. Архитектура математического ядра цифровых двойников различных физико-химических систем на базе метода математического прототипирования энергетических процессов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 160–168. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-17

## ARCHITECTURE OF THE MATHEMATICAL CORE OF DIGITAL TWINS OF VARIOUS PHYSICAL AND CHEMICAL SYSTEMS BASED ON THE METHOD OF MATHEMATICAL PROTOTYPING OF ENERGY PROCESSES

I.E. Starostin<sup>1</sup>, S.I. Gavrilencov<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia  
<sup>1</sup> starostinigo@yandex.ru, <sup>2</sup> gavrilencov@mstuca

**Abstract.** *Background.* The basis for solving practical problems of modern engineering and technology are mathematical models of objects in which processes of various physical and chemical nature occur. The main requirements for mathematical models are their accuracy and adequacy (i.e. consistency with physical and chemical laws). In general,

to build such models of systems, the author proposed a method of mathematical prototyping of energy processes within the framework of mechanics, electrodynamics and modern nonequilibrium thermodynamics. Accordingly, the models of physical and chemical processes of various nature, given by the above-mentioned method, do not contradict the general physical laws (the laws of thermodynamics, mechanics and electrodynamics), as well as the physical features of the system under consideration. However, for the numerical implementation of the above-mentioned mathematical models, test data of the objects is necessary. Since, taking into account the aging processes occurring in the object, its properties change, there is a need for continuous monitoring of its condition, which can be carried out by continuous processing of data of its measured parameters. This is what determines the need to use digital twins of the object under consideration, and the mathematical core of the said digital twins is based on the method of mathematical prototyping of energy processes. The architecture of the mathematical core of such digital twins is the subject of this paper. *Materials and methods.* The synthesis of equations of dynamics of physical and chemical processes is carried out on the basis of the method of mathematical prototyping of energy processes. The analytical solution of the equations of the system dynamics is constructed by special methods of integrating systems of differential equations. Based on the mentioned analytical solution, a model of the system is constructed for solving practical problems. *Results.* The proposed architecture of the mathematical core of digital twins of various physical and chemical systems based on the method of mathematical prototyping allows for more accurate diagnosis and prediction of the state of such systems. *Conclusions.* The proposed architecture of the mathematical core of digital twins of systems of various physical and chemical nature is a unified approach to constructing the mathematical core of digital twins of the mentioned systems of various nature.

**Keywords:** method of mathematical prototyping of energy processes, mathematical modeling, digital twins

**For citation:** Starostin I.E., Gavrilin S.I. Architecture of the mathematical core of digital twins of various physical and chemical systems based on the method of mathematical prototyping of energy processes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):160–168. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-17

## Введение

Концепция цифрового двойника (ЦД) призвана ускорить обнаружение физических проблем, производить более качественный продукт, а также диагностировать и прогнозировать в режиме реального времени различные дефекты и аварийные режимы [1, 2]. Важнейшей составляющей математического ядра ЦД объекта является математическая модель (ММ), воспроизводящая его реальное поведение [3].

Для построения упомянутых ММ объектов, характеризующихся протеканием в них физических и химических процессов различной природы, автором был предложен в рамках современной неравновесной термодинамики, механики и электродинамики метод математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП) [4–6]. Отсюда построенные ММПЭП модели динамики процессов различной физической и химической природы не противоречат общим физическим законам (законам сохранения, началам термодинамики, и т.д.), а также физическим особенностям протекания процессов в рассматриваемом объекте [4, 5]. ММ объекта, которая является основой математического ядра его ЦД, получается путем задания аналитического выражения общего решения систем дифференциальных уравнений ММПЭП, вбирающего в себя физические особенности протекания процессов в рассматриваемом объекте, коэффициенты которого определяются из уравнений ММПЭП [5].

Для построения ММ системы на основе ММПЭП и последующего построения аналитических выражений общего решения систем уравнений ММПЭП целесообразно применять методы декомпозиции [5, 7], т.е. сначала строятся локально упрощенные ММ на основе ММПЭП, затем полученные модели объединяются в сложную модель (также даваемой ММПЭП) [4–8]. Упомянутая декомпозиция позволяет полностью формализовать и существенно ускорить построение ММ систем различной физической и химической природы [7, 8]. Это дает возможность разработки на базе ММПЭП единого подхода построения математического ядра ЦД различных физико-химических объектов, которому посвящена настоящая работа.

## Материалы и методы

В соответствие с ММПЭП состояние системы однозначно характеризуется независимо от ее предыстории параметрами состояния [4]. Причиной (и необходимым условием) протекания процессов в системе являются динамические силы, определяемые через частные производные свободной энергии по координатам состояния, расходуемой на протекание процессов в системе [4]. Помимо динамических сил независимо от последних протекание процессов в системе определяется кинетическими свойствами (рис. 1) [4]. Динамика процессов в системе в свою очередь определяет динамику измеряемых параметров (ИП) и контролируемых параметров (КП) (рис. 1) [4].

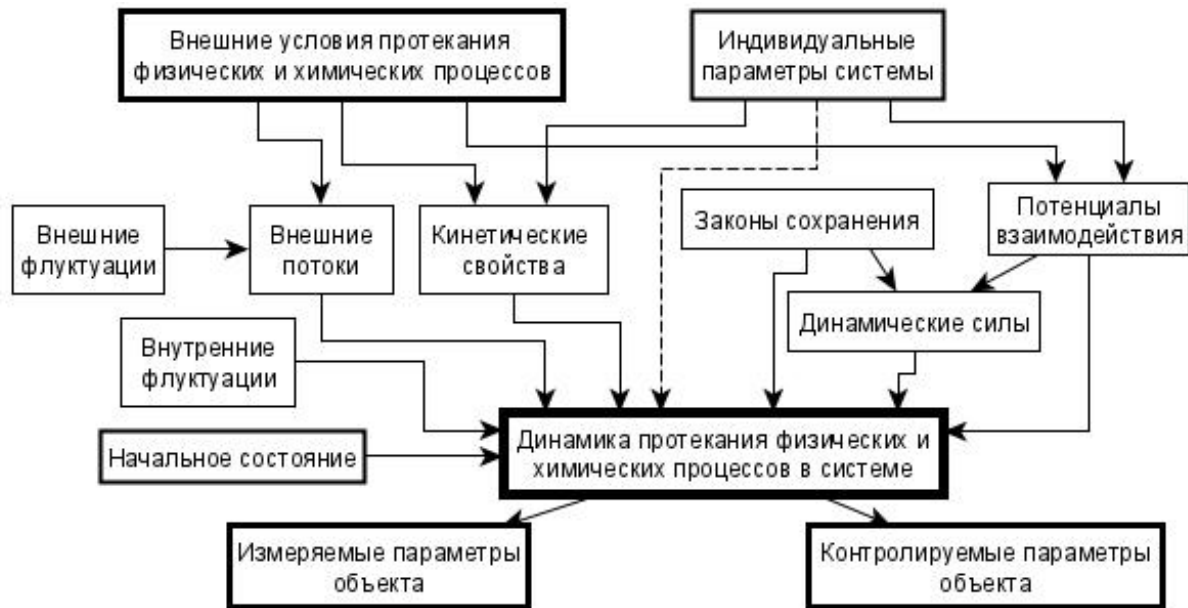


Рис. 1. Факторы, определяющие динамику физических и химических процессов

В общем случае ММ рассматриваемого объекта (см. рис. 2) представляет собой алгоритм определения из экспериментальных данных ИП объекта его начального состояния и индивидуальных параметров с последующим определением КП рассматриваемого объекта (с учетом внешних условий протекания процессов) (видно из рис. 1) – математическое ядро ЦД объекта [4, 6]. Следует отметить, что в КП рассматриваемого могут войти и его ИП в последующие моменты времени [6].



Рис. 2. Математическая модель системы для решения практических задач.

Пунктиром показаны задания аналитического решения

Аналитически общее решение системы дифференциальных уравнений ММПЭП представимо в виде [5]:

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

$$\Delta \mathbf{x}(t) = \Delta \tilde{\mathbf{x}}^* \left( \epsilon(\epsilon_0, t), \hat{\mathbf{u}}(t, \hat{\mathbf{u}}), \mathbf{q}_{\text{дисс}}, \bar{\mathbf{s}}(t) \right), \quad \hat{\mathbf{u}} = \hat{\mathbf{u}}[U(t)], \quad (2)$$

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

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

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

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

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

где  $\mathbf{x}(t)$  – динамика параметров состояния системы;  $U(t)$  – динамика характеристик системы, не изменяющихся в результате протекания процессов внутри системы, а изменяющихся только в результате внешних воздействий на нее;  $(d\mathbf{x}(t)/dt)_{\text{ext}}$  – внешние потоки в систему. Как видно из выражений (1)–(7), функция  $\tilde{\mathbf{x}}^* \left( \Delta \mathbf{x}, U, \mathbf{q}_{\text{топ}}, \hat{\mathbf{s}}^* \right)$  характеризует топологическую, функция  $\Delta \tilde{\mathbf{x}}^* \left( \epsilon, U, \mathbf{q}_{\text{дисс}}, \mathbf{s} \right)$  – диссипативную, а функции  $\hat{\mathbf{s}}^* \left( \epsilon, U, \mathbf{s}, \mathbf{q}_{\text{упр}} \right)$  и  $\hat{\mathbf{s}} \left( \epsilon, U, \mathbf{q}_{\text{упр}} \right)$  – управляющую составляющие системы [5]. Для любой системы (1)–(7) найдется система уравнений ММПЭП, общим решением которого будет (1)–(7) [5], т.е. аналитическое задание (1)–(7) общего решения уравнений ММПЭП корректно [5]. Квадратные скобки в выражении (1) означают взятие функционала динамики  $U(t)$ .

Как известно из теории динамических систем [10], любая динамика системы стремится к некоторой ее установившейся динамике [10]. Соответственно, как нетрудно видеть, входящая в (1)–(7) управляющая составляющая системы характеризует ее установившуюся динамику, а диссипативная составляющая – переход к последней. Также видно, что в случае выполнения условия (7) уравнения (1)–(4) будут описывать множество непересекающихся в фазовом пространстве динамик состояния системы [5, 11]. Обратно, упомянутое множество непересекающихся динамик удовлетворяет (1)–(4) [11]. Отсюда аналитическое выражение динамики [5, 9]:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}_x \left( t, \hat{\mathbf{b}}_{x,0}, \hat{\mathbf{b}}_x \right), \quad \hat{\mathbf{b}}_{x,0} = \hat{\mathbf{b}}_{x,0}(\mathbf{x}_0), \quad \hat{\mathbf{b}}_x = \hat{\mathbf{b}}_x(\hat{\mathbf{b}}), \quad \hat{\mathbf{b}} = \hat{\mathbf{b}}(\hat{\mathbf{u}}, \mathbf{p}, \mathbf{b}), \quad (8)$$

описывающее качественный характер динамики системы (т.е. установившиеся и переходные динамики, пересекаемость/непересекаемость динамик в фазовом пространстве, участки монотонности, выпуклости и т.д.), полученной ММПЭП, удовлетворяет (1)–(7), т.е. является корректным [5, 9]. Входящие в уравнение (8) параметры  $\mathbf{p}$  – индивидуальные параметры рассматриваемой системы (т.е. меняющиеся от экземпляра к экземпляру системы рассматриваемого класса);  $\mathbf{b}$  – параметры, одинаковые для всего класса рассматриваемой системы;  $\mathbf{x}_0$  – начальное состояние системы;  $\hat{\mathbf{b}}$  – параметры, меняющиеся независимо друг от друга с изменением  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{b}$  при любых фиксированных  $\hat{\mathbf{u}}$  [5, 9].

Измеряемые  $\mathbf{y}(t)$  и контролируемые  $\mathbf{z}(t)$  параметры системы [4, 5]:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{Y} \left( t, \mathbf{c}_y, \mathbf{p}, \mathbf{b} \right), \quad \mathbf{z}(t) = \mathbf{Z} \left( t, \mathbf{c}_z, \mathbf{p}, \mathbf{b} \right), \quad \mathbf{c}_y = \mathbf{c}_y \left[ \mathbf{x}(t), U(t) \right], \quad \mathbf{c}_z = \mathbf{c}_z \left[ \mathbf{x}(t), U(t) \right]. \quad (9)$$

Согласно уравнениям (8) и (9) имеем

$$\mathbf{y}(t) = \tilde{\mathbf{g}}_y \left( t, \hat{\mathbf{b}}_{x,0}, \hat{\mathbf{b}}_y \right), \quad \mathbf{z}(t) = \tilde{\mathbf{g}}_z \left( t, \hat{\mathbf{b}}_{x,0}, \hat{\mathbf{b}}_z \right), \quad \hat{\mathbf{b}}_y = \hat{\mathbf{b}}_y(\hat{\mathbf{b}}), \quad \hat{\mathbf{b}}_z = \hat{\mathbf{b}}_z(\hat{\mathbf{b}}). \quad (10)$$

Для задания аналитического выражения (8) динамики рассматриваемой системы используется локальное упрощение уравнений ММПЭП с последующим получением соответствующих упрощенных аналитических выражений (8), из которых формируется полное общее решение (8) исходных дифференциальных уравнений ММПЭП [4, 5, 8, 9, 12]. Это дает возможность, используя аналогию локально упрощенных дифференциальных уравнений ММПЭП, существенно упростить построение аналитического выражения (8) [7]. Записав (10) для репрезентативных участков динамики ИП  $y_r(t)$  в текущем режиме работы рассматриваемой системы, а также контрольных динамик  $\{y_i^{(k)}(t)\}_{i=1}^{n_k}$ , соответствующих  $\hat{u}_i^{(k)}$ ,  $i = \overline{1, n_k}$ , имеем [9]

$$y_r(t) = \tilde{g}_y(t, \hat{b}_{x,0}, \hat{b}_y(\hat{b})) , y_i^{(k)}(t) = \tilde{g}_y(t, \hat{b}_{x,0,i}, \hat{b}_y(\hat{b}_i)) , i = \overline{1, n_k} , \quad (11)$$

где в силу (8):

$$\hat{b} = \hat{b}(\hat{u}, p, b) , \hat{b}_i^{(k)} = \hat{b}(\hat{u}_i^{(k)}, p, b) , i = \overline{1, n_k} . \quad (12)$$

Введя, используя (11), функции  $\bar{g}_{x_0}$  и  $\bar{g}_{b_v}$ ,  $\bar{g}_{b_c}$  в виде [9]:

$$\hat{b}_{x,0} = \bar{g}_{x_0}[y_r(t)] , \hat{b} = (\hat{b}_v, \hat{b}_c) , \hat{b}_v = \bar{g}_{b_v}[y_r(t)] , \hat{b}_c = \bar{g}_{b_c}[y_r(t)] , \quad (13)$$

(используя методы символьной регрессии [13–15], методы интерполяции [8], нейронные сети как универсальный интерполятор [16]), имеем, воспользовавшись методами интерполяции [8], в силу (12) и (13) [5, 9]:

$$\hat{b}_c = \hat{b}_u \left( \left\{ \hat{u}_i^{(k)}, \hat{b}_{c,i}^{(k)} \right\}_{i=1}^{n_k}, \hat{u} \right) , \hat{b}_{c,i}^{(k)} = \bar{g}_{b_c}[y_i^{(k)}(t)] , i = \overline{1, n_k} , \quad (14)$$

где  $\hat{b}_u$  – выбранный метод интерполяции [8] (в частности, нейронные сети [16]). В силу (13), (14) уравнение (8) примет вид [5]:

$$x(t) = F_x(t, \hat{b}_{x,0}, \hat{b}_x(\hat{b}_v, \hat{b}_c)) , \hat{b}_{x,0} = \bar{g}_{x_0}[y_r(t)] , \hat{b}_v = \bar{g}_{b_v}[y_r(t)] . \quad (15)$$

Нетрудно видеть, что заданное в виде (14), (15) аналитическое выражение общего решения уравнений ММПЭП является корректным, т.е. удовлетворяет (1)–(7) [5, 9]. Согласно (8), (13) имеем для параметров  $p$ ,  $b$ :

$$(\hat{b}_{v,i}^{(k)}, \hat{b}_{c,i}^{(k)}) = \hat{b}(\hat{u}_i^{(k)}, p, b) , p = (p_{v,i}, p_c) , \hat{b}_{v,i}^{(k)} = \bar{g}_{b_v}[y_i^{(k)}(t)] , i = \overline{1, n_k} ; \quad (16)$$

$$(\hat{b}_v, \hat{b}_c) = \hat{b}(\hat{u}, p, b) , p = (p_v, p_c) , \hat{b}_{x,0}(x_0) = \hat{b}_{x,0} , \quad (17)$$

где  $p_v$ ,  $p_c$  – индивидуальные параметры системы, соответственно медленно меняющиеся в результате процессов старения или не меняющиеся вообще. Оценив в силу (14)–(17) начальные приближения параметров  $\hat{b}_{x,0}$ ,  $\hat{b}_v$ ,  $\hat{b}_c$ ,  $x_0$ ,  $p$  и частично параметров  $b$ , мы затем с использованием уравнений ММПЭП упомянутые параметры уточним (специальные методы численного интегрирования систем дифференциальных уравнений [8]), что существенно ускорит построение ММ рассматриваемой системы [4, 8]. Уточнение осуществляется путем сведения к нулю разности скорости изменения состояния системы, полученной путем дифференцирования по времени (15) и скорости изменения состояния системы, полученной из уравнений ММПЭП, и разности расчетных и экспериментальных значений ИП (см. рис. 2) [6]. Полученные аналитические выражения (10) для ИП и КП непосредственно используются для решения практических задач (см. рис. 2) [6, 9].

Аналогично выражения (14)–(17) можно строить для локальных упрощений уравнений ММПЭП в каждой области упрощений [5, 12], которое осуществляется путем упрощения функций состояния (ФС) для свойств веществ и процессов (СВП) (см. рис. 1) с сохранением соответствующих ограничений на соответствующие ФС [4]. Отсюда, идентифицировав, используя (14)–(17), локально



В первом случае после расчета параметров аналитического выражения (14), (15) динамики состояния системы последнее подается в функцию параметров системы (на рис. 3 показано пунктирной стрелкой) с получением аналитической модели системы (10), (14) (рис. 3). Во втором случае после расчета параметров аналитического выражения (14), (15) эти параметры уточняются (на рис. 3 блок интегратора динамики состояния (БИДС) с использованием блока оптимизатора) с последующим получением аналитической модели (10), (14).

Более того, БИДС может выполнять функцию построения аналитической модели (14), (15) в заданном классе аналитических моделей (показанный на рис. 3 блок класса аналитических выражений динамики состояния системы). В таком случае построение аналитического выражения (14), (15) осуществляется в БИДС вышеописанными методами, в том числе методами символьной регрессии [12–15], шаговыми методами [8] с последующей аппроксимацией вычисляются опорные динамики (14), (15) [15].

Для вычисления динамики состояния системы БИДС принимает на вход функцию правой части, даваемую блоком, реализующим ММПЭП, который в свою очередь на вход принимает структуру системы и ФС для СВП, а также функцию внешних воздействий, даваемую блоком внешних воздействий (рис. 3). Реализация ММПЭП в соответствующем блоке (рис. 3) осуществляется с использованием блочного или матричного подхода [20], что позволяет ускорить расчеты путем распараллеливания вычислений [20]. Блоки предобработки динамики измеряемых параметров, свойств веществ и процессов в системе, внешних воздействий на систему в общем случае представляют собой функции, содержащие внутри себя свойства класса системы.

Обучение ММ, положенной в основу математического ядра ЦД, осуществляется путем локального упрощения ФС для СВП. Для этого задается блок класса ФС для СВП (рис. 3) [4]. Настройка параметров модели, полученной ММПЭП, (показано на рис. 3 толстой пунктирной линией) осуществляется путем сведения расчетных значений ИП к соответствующим экспериментальным в каждой области локального упрощения ФС для СВП с последующим построением полных ФС для СВП [4, 12, 15].

## Результаты

Универсальный класс ЦД объектов различной физической и химической природы, показанный на рис. 3, сколь угодно точно диагностирует и прогнозирует их параметры в приемлемые сроки. Это достигается использованием параллельной реализации матричных операций и параллельного расчета динамик при разных параметрах системы.

## Обсуждение

Для реализации ЦД предложенного класса необходимо разработать единые классы ФС для СВП, в котором для каждой конкретной системы задаются соответствующие опции. Аналогичное касается и класса аналитических ММ динамик. Также необходимо разрабатывать соответствующие эвристические методы для алгоритмов поиска ММ в упомянутых классах [12–15].

## Заключение

Универсальность предложенного класса ЦД различных физико-химических объектов обуславливает необходимость разработки программно-технологической платформы ЦД на базе ММПЭП. Основная задача упомянутой платформы – разработка показанных на рис. 3 блоков в зависимости от требований пользования в соответствующей предметной области [20].

## Список литературы

1. Гончаров А. С., Саклаков В. М. Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСИТ-2018) : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Кемерово, 11–13 октября 2018 г.). Кемерово, 2018. С. 24–26.
2. Курганова Н. В., Филин М. А., Черняев Д. С. [и др.]. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Vol. 7, № 5. P. 105–115.
3. Петров А. В. Имитация как основа технологии цифровых двойников // Вестник ИрГТУ. 2018. Т. 22, № 10. С. 56–66. doi: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66

4. Khalyutin S. P., Starostin I. E., Agafonkina I. V. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development // *Energies*. 2023. № 16 (4). P. 1933–1958. doi: 10.3390/en16041933
5. Старостин И. Е. Построение на основе интерполяции моделей различных физических и химических систем методом математического прототипирования энергетических процессов // *Надежность и качество сложных систем*. 2024. № 1. С. 49–59. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-6
6. Старостин И. Е., Дружинин А. А., Гавриленков С. И. Использование машинного обучения с учителем для построения математических моделей систем методом математического прототипирования энергетических процессов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2023. Т. 1. С. 66–72.
7. Антонов А. В. Системный анализ. М. : Высш. шк., 2004. 454 с.
8. Калиткин Н. Н. Численные методы. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 592 с.
9. Старостин И. Е. Метод математического прототипирования энергетических процессов как инструмент синтеза математического ядра цифровых двойников различных физико-химических систем // *Надежность и качество сложных систем*. 2024. № 3. С. 41–50. doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-5.
10. Немыцкий В. В., Степанов В. В. Качественная теория дифференциальных уравнений. М.-Л. : ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1947. 448 с.
11. Арнольд В. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Ижевск : Удмурт. гос. ун-т, 2000. 369 с.
12. Ланцов В. Н. Методы понижения порядка моделей сложных систем. Владимир : Издательство ВлГУ, 2017. 84 с.
13. Данг Тхи Фук, Дивеев А. И., Софронова Е. А. Решение задач идентификации математических моделей объектов и процессов методом символьной регрессии // *Cloud of Science*. 2018. Т. 5, № 1. С. 147–162.
14. Дивеев А. И., Ломакова Е. М. Метод бинарного генетического программирования для поиска математического выражения // *Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования*. 2017. Т. 18, № 1. С. 125–134.
15. Стрижов В. В. Методы индуктивного порождения регрессионных моделей. М. : Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, 2008. 56 с.
16. Haykin S. *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*. Upper Saddle River, USA : Prentice hall, 2006. 1105 p.
17. Старостин И. Е., Халютин С. П. Аналитическая модель динамики напряжения литийионного аккумулятора // *Электричество*. 2024. № 10. С. 13–22.
18. Соловьев И. Г., Говорков Д. А., Цибульский В. Р. Идентификация гидродинамической модели скважины с электроцентробежным насосом по данным контроля возмущенных режимов эксплуатации // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331, № 5. С. 181–192.
19. Разиндзатуву Ж. С., Гишваров А. С. Параметрическая диагностика одновального ГТД на основе нейросетевого моделирования рабочих процессов // *Вестник УГАТУ*. 2017. Т. 21, № 4 (78). С. 86–96.
20. Starostin I. E., Druzhinin A.A. The concept of a software and technological platform for digital twins based on energy dynamics methods // *2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2023. P. 1–6.

### References

1. Goncharov A.S., Saklakov V.M. Digital twin: an overview of existing solutions and prospects for technology development. *Informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy i tekhnologii (ITSIT-2018): materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. (g. Kemerovo, 11–13 oktyabrya 2018 g.) = Information and telecommunication systems and technologies (ITSIT-2018) : proceedings of the All-Russian scientific and practical conference (Kemerovo, October 11–13, 2018)*. Kemerovo, 2018:24–26. (In Russ.)
2. Kurganova N.V., Filin M.A., Chernyaev D.S. et al. The introduction of digital twins as one of the key areas of digitalization of production. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019;7(5):105–115. (In Russ.)
3. Petrov A.V. Imitation as the basis of digital twin technology. *Vestnik IrGTU = Bulletin of IrSTU*. 2018;22(10): 56–66. (In Russ.). doi: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66
4. Khalyutin S.P., Starostin I.E., Agafonkina I.V. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development. *Energies*. 2023;(16):1933–1958. doi: 10.3390/en16041933
5. Starostin I.E. Building models of various physical and chemical systems based on interpolation by mathematical prototyping of energy processes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):49–59. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-6
6. Starostin I.E., Druzhinin A.A., Gavrilencov S.I. Using machine learning with a teacher to build mathematical models of systems by mathematical prototyping of energy processes. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:66–72. (In Russ.)
7. Antonov A.V. *Sistemnyy analiz = System analysis*. Moscow: Vyssh. shk., 2004:454. (In Russ.)
8. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011:592. (In Russ.)

9. Starostin I.E. Method of mathematical prototyping of energy processes as a tool for synthesizing the mathematical core of digital twins of various physico-chemical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(3):41–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-5.
10. Nemytskiy V.V., Stepanov V.V. *Kachestvennaya teoriya differentsial'nykh uravneniy = Qualitative theory of differential equations*. Moscow-Leningrad: OGIZ Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1947:448. (In Russ.)
11. Arnol'd V.I. *Obyknovennyye differentsial'nye uravneniya = Ordinary differential equations*. Izhevsk: Udmurt. gos. un-t, 2000:369.
12. Lantsov V.N. *Metody ponizheniya poryadka modeley slozhnykh system = Methods of lowering the order of models of complex systems*. Vladimir: Izdatel'stvo VIGU, 2017:84. (In Russ.)
13. Dang Tkhi Fuk, Diveev A.I., Sofronova E.A. Solving problems of identification of mathematical models of objects and processes by symbolic regression. *Cloud of Science*. 2018;5(1):147–162. (In Russ.)
14. Diveev A.I., Lomakova E.M. Binary genetic programming method for searching mathematical expressions. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Ser.: Inzhenernye issledovaniya = Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Ser.: Engineering Research*. 2017;18(1):125–134. (In Russ.)
15. Strizhov V.V. *Metody induktivnogo porozhdeniya regressionnykh modeley = Methods of inductive generation of regression models*. Moscow: Vychislitel'nyy tsentr im. A.A. Dorodnitsyna RAN, 2008:56. (In Russ.)
16. Haykin S. *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*. Upper Saddle River, USA: Prentice hall, 2006:1105.
17. Starostin I.E., Khalyutin S.P. Analytical model of lithium-ion battery voltage dynamics. *Elektrichestvo = Electricity*. 2024;(10):13–22. (In Russ.)
18. Solov'ev I.G., Govorkov D.A., Tsibul'skiy V.R. Identification of the hydrodynamic model of a well with an electric centrifugal pump based on monitoring data of disturbed operating modes. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2020;331(5):181–192. (In Russ.)
19. Raerindzatu Zh.S., Gishvarov A.S. Parametric diagnostics of single-channel GTE based on neural network modeling of work processes. *Vestnik UGATU = Bulletin of UGATU*. 2017;21(4):86–96. (In Russ.)
20. Starostin I.E., Druzhinin A.A. The concept of a software and technological platform for digital twins based on energy dynamics methods. *2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2023:1–6.

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### Игорь Евгеньевич Старостин

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

##### Igor E. Starostin

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

##### Станислав Иванович Гавриленков

заведующий учебной лабораторией  
кафедры электротехники и авиационного  
электрооборудования,  
Московский государственный технический  
университет гражданской авиации  
(Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)  
E-mail: gavrilenkov@mstuca

##### Stanislav I. Gavrilencov

Head of the educational laboratory  
of the sub-department of electrical engineering  
and aviation electrical equipment,  
Moscow State Technical University of Civil Aviation  
(20 Kronshtadtskiy boulevard, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 25.09.2024

Поступила после рецензирования / Revised 21.10.2024

Принята к публикации / Accepted 05.11.2024