

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА**

**Кубасов И. А., Лекарь Л. А.**  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ПОДВИЖНЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАЗНЕСЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ..... 5

**Хай Чан Минь, Фонг Ку Тхань, Тханг Нгуен Тхе, Санг Нгуен Тхань, Юрков Н. К., Ту Фам Ван**  
ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА  
СУТЕНО В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО  
РЕСУРСА АВИАЦИОННЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ..... 15

**Годунов А. И., Суздальцев П. С., Кузин Н. А.**  
МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
В СИСТЕМЕ «ПОРАЖАЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ – ПРЕГРАДА» ..... 26

**Ильиных В. В., Андреев С. В., Ключников А. В., Чертков М. С.**  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ МУЛЬТИРОТОРНОГО  
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ..... 34

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

**Бейсембаева Б. С., Горячев Н. В., Лысенко А. В., Трусов В. А., Юрков Н. К.**  
СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ БЕСКОНТАКТНОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ  
ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ..... 47

**Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В.**  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАКОЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ..... 56

**Заяра А. В., Данилин М. Е.**  
ОЧУВСТВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОАППАРАТУРЫ МОБИЛЬНЫХ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ..... 63

**Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В.**  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО ВКЛЮЧАТЕЛЯ ..... 71

**Каргашова Е. Д., Муйземнек А. Ю.**  
СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ  
КОНСТАНТ ПОЛИМЕРНО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ,  
ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ..... 80

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

<b>Заяра А. В., Фандеев В. П.</b> ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОАППАРАТУРЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ .....	89
<b>Перевертов В. П., Юрков Н. К., Чертыковцева Н. В., Новикова В. Н., Кузин Н. А.</b> ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА .....	99

## **БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

<b>Годунов А. И., Ерофеев М. В., Избасов А. Г., Мухамбетов А. М., Юрков Н. К.</b> МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СЛУЧАЕВ ПРОНИКНОВЕНИЯ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ И ДИВЕРСИОННЫХ ГРУПП.....	109
<b>Маслобоев А. В.</b> ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ИНДЕКСНЫМИ МЕТОДАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ .....	119
<b>Перевертов В. П., Юрков Н. К., Андрончев И. К., Новикова В. Н., Кузин Н. А.</b> ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ПОЕЗДОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ .....	136

# RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

№ 2 (50) 2025

## CONTENT

### FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

**Kubasov I.A., Lekar L.A.**

DESIGN OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC MONITORING  
OF MOBILE TERRITORIALY SEPARATED OBJECTS ..... 5

**Hải Trần Minh, Phong Ku Thanh, Thang Nguyen The, Sáng Nguyễn Thanh, Yurkov N.K., Tú Phạm Văn**

APPLICATION OF SUGENO FUZZY INFERENCE ALGORITHM IN THE PROBLEM  
OF PREDICTING THE RESIDUAL LIFE OF AVIATION RADIOTECHNICAL EQUIPMENT ..... 15

**Godunov A.I., Suzdaltsev P.S., Kuzin N.A.**

A MODEL OF HIGH-SPEED INTERACTION IN THE «STRIKING ELEMENT – BARRIER» SYSTEM.....26

**Ilyinykh V.V., Andreev S.V., Klyuchnikov A.V., Chertkov M.S.**

MATHEMATICAL MODEL OF MOTION OF A MULTIROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE.....34

### DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

**Beisembayeva B.S., Goryachev N.V., Lysenko A.V., Trusov V.A., Yurkov N.K.**

MEANS OF IMPLEMENTING A NON-CONTACT METHOD FOR MEASURING TEMPERATURE  
DURING NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THERMAL MODES OF ELECTRONIC MEANS.....47

**Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V.**

MATHEMATICAL MODEL OF THE PIERCING MECHANISM .....56

**Zayara A.V., Danilin M.E.**

SENSITIVITY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT  
OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES FOR SOLVING MONITORING TASKS .....63

**Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V.**

MATHEMATICAL MODEL OF THE INERTIA SWITCH.....71

**Kartashova E.D., Muizemnek A.Yu.**

COMPARISON OF THE RESULTS OF CALCULATION OF ENGINEERING CONSTANTS  
OF POLYMER-METALLIC COMPOSITES OBTAINED BY VARIOUS METHODS .....80

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

**Zayara A.V., Fandeyev V.P.**

ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT  
IN MOBILE ROBOTIC COMPLEXES USING FUZZY CLASSIFICATION.....89

**Perevertov V.P., Yurkov N.K., Chertykovtseva N.V., Novikova V.N., Kuzin N.A.**  
DIAGNOSTIC SYSTEM FOR OPTIMIZING THE DIESEL LOCOMOTIVE COOLING MODES..... 99

### **SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS**

**Godunov A.I., Erofeev M.V., Izbasov A.G., Mukhambetov A.M., Yurkov N.K.**  
METHODS AND MEANS OF MONITORING CASES OF PENETRATION  
OF SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLES BY TERRORIST AND SABOTAGE GROUPS ..... 109

**Masloboev A.V.**  
ECOLOGICAL RESILIENCE ASSESSMENT FEATURES OF NATURAL-INDUSTRIAL  
SYSTEMS BY INDEX-BASED METHODS USING SOFT COMPUTING ..... 119

**Perevertov V.P., Yurkov N.K., Andronchev I.K., Novikova V.N., Kuzin N.A.**  
FEATURES OF INCREASING TRAFFIC SAFETY AND RELIABILITY  
OF USING GAS-TURBINE TRAINS IN HIGH-SPEED RAILWAYS ..... 136

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

## FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 004.057.8

doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-1

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОДВИЖНЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАЗНЕСЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

И. А. Кубасов<sup>1</sup>, Л. А. Лекарь<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Академия управления Министерства внутренних дел Российской Федерации, Москва, Россия

<sup>1</sup> igorak@list.ru, <sup>2</sup> antonna47@bk.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Сегодня беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – это летающие устройства, которые могут управляться без участия человека, представляют собой не просто забавную игрушку. С их помощью осуществляется изучение поверхности земли, мониторинг лесных пожаров и наводнений, а также многое другое и не только в мирных целях. При этом их возможности совершенствуются с каждым днем, а сферы применения увеличиваются с невероятной скоростью. Особую актуальность приобретает реализация автоматического мониторинга за множеством различных подвижных объектов на многокилометровой территории для выявления возможных нарушений и обеспечения оперативного пресечения этих нарушений. Целью данной работы является разработка предложений по проектированию сложной системы и созданию технологии для реализации автоматического мониторинга за подвижными территориально разнесенными объектами. *Материалы и методы.* Проектируемая сложная система автоматического мониторинга состоит из: пункта управления с персональным компьютером и выходом в сеть Интернет; одной или нескольких баз размещения БПЛА; БПЛА с беспроводным выходом в сеть Интернет; приложений на смартфонах/планшетах сотрудников оперативных групп реагирования на нарушения. Технология должна быть комплексной (гибридной), позволяющей получить требуемый эффект за счет применения БПЛА, системы определения местоположения ГЛОНАСС, интернета вещей, компьютерного зрения и системы связи. Для решения задач распознавания объектов предполагается использовать технологии машинного обучения. *Результаты.* Проектирование системы автоматического мониторинга подвижных территориально разнесенных объектов является сложным процессом, требующим привлечения специалистов различного профиля: инженеров, программистов, аналитиков и операторов. Правильно спроектированная и реализованная система способна существенно повысить эффективность контроля над территорией и обеспечить своевременное реагирование на любые нарушения. *Выводы.* Предлагаемая система и гибридная технология автоматического мониторинга подвижных территориально разнесенных объектов позволяют получить синергетический эффект за счет комплексного применения системы определения местоположения ГЛОНАСС, БПЛА, интернета вещей, компьютерного зрения и системы связи.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, проектируемая сложная система, гибридная технология, Глонасс, компьютерное зрение, сверточные нейронные сети

**Для цитирования:** Кубасов И. А., Лекарь Л. А. Проектирование системы автоматического мониторинга подвижных территориально разнесенных объектов // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 5–14. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-1

## DESIGN OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC MONITORING OF MOBILE TERRITORIAALLY SEPARATED OBJECTS

I.A. Kubasov<sup>1</sup>, L.A. Lekar<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Moscow, Russia

<sup>1</sup> igorak@list.ru, <sup>2</sup> antonna47@bk.ru

**Abstract.** *Background.* Today, unmanned aerial vehicles (UAVs) are flying devices that can be controlled without human intervention, and are not just a fun toy. They are used to study the earth's surface, monitor forest fires and floods, and much more, and not only for peaceful purposes. At the same time, their capabilities are improving every day, and the scope of application is increasing at an incredible rate. Of particular relevance is the implementation of automatic monitoring of many different moving objects over a multi-kilometer territory to identify possible violations and ensure prompt suppression of these violations. The purpose of this work is to develop proposals for the design of a complex system and the creation of technology for the implementation of automatic monitoring of moving geographically dispersed objects. *Materials and methods.* The designed complex automatic monitoring system should consist of: a control point with a personal computer and Internet access; one or several UAV placement bases; UAVs with wireless Internet access; applications on smartphones/tablets of the employees of operational response groups to violations. The technology should be comprehensive (hybrid), allowing to obtain the required effect due to the use of UAVs, GLONASS positioning system, Internet of things, computer vision and communication system. Machine learning technologies are supposed to be used to solve the problems of object recognition. *Results.* Designing an automatic monitoring system for mobile geographically dispersed objects is a complex process that requires the involvement of specialists of various profiles: engineers, programmers, analysts and operators. A correctly designed and implemented system can significantly increase the effectiveness of control over the territory and ensure a timely response to any violations. *Conclusions.* The proposed system and hybrid technology for automatic monitoring of mobile geographically dispersed objects allow for a synergistic effect due to the integrated use of the GLONASS location system, UAVs, the Internet of Things, computer vision and communication systems.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, designed complex system, hybrid technology, GLONASS, computer vision, convolutional neural networks

**For citation:** Kubasov I.A., Lekar L.A. Design of a system for automatic monitoring of mobile territorially separated objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):5–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-1

### Введение

Актуальность применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) обусловлена их широким спектром возможностей и растущим спросом в различных сферах жизни и деятельности общества благодаря своей универсальности, эффективности и экономичности [1–4].

Особую актуальность приобретают беспилотные летательные аппараты, применяемые для мониторинга подвижных объектов (перемещения людей, животных или транспортных средств) на многокилометровой территории. Это обусловлено несколькими ключевыми факторами:

- 1) широкий охват территории за короткое время благодаря мобильности и автономности БПЛА;
- 2) высокая точность и оперативность получения данных об изменении ситуации на наблюдаемой территории благодаря оснащённости БПЛА камерами высокого разрешения, тепловизорами и другими сенсорами;
- 3) экономическая эффективность применения БПЛА по сравнению с патрулированием наземными силами или использованием пилотируемых воздушных судов;
- 4) безопасность применения БПЛА для персонала в связи с отсутствием непосредственно в месте опасных зон (военных действий, природных катастроф, повышенной радиационной опасности и т.п.);
- 5) сокращение количества ошибок персонала, связанных с человеческим фактором, благодаря автоматизации процессов мониторинга (в том числе планирования маршрутов полета, обработки полученных данных и их анализа).

Целью данной работы является разработка предложений по проектированию сложной системы и созданию технологии для реализации автоматического мониторинга за подвижными территориально разнесенными объектами.

### Материалы и методы

Предлагается спроектировать следующую сложную систему автоматического мониторинга подвижных объектов (рис. 1).

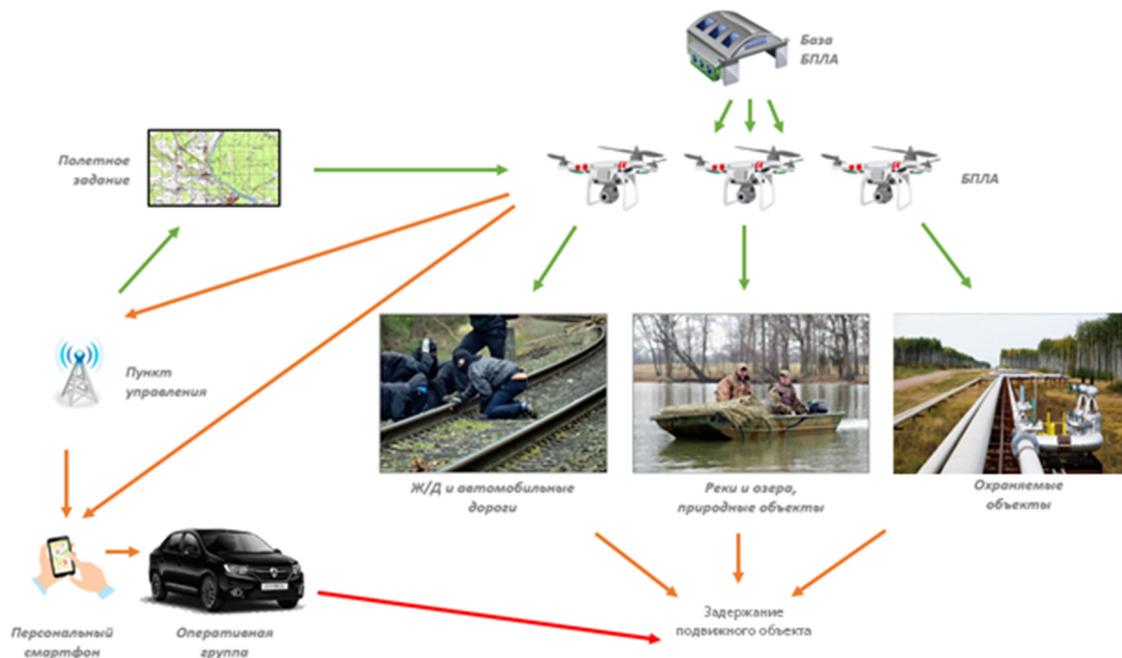


Рис. 1. Схема применения сложной системы автоматического мониторинга

Задача системы автоматического мониторинга – реализовывать автоматическое наблюдение за подвижными объектами на большой территории, выявлять нарушения и обеспечивать оперативное пресечение этих нарушений.

Система автоматического мониторинга должна состоять из:

- пункта управления с персональным компьютером и выходом в сеть Интернет;
- одной или нескольких баз размещения БПЛА;
- БПЛА с беспроводным выходом в сеть Интернет;
- приложений на смартфонах/планшетах сотрудников оперативного реагирования.

Типовой порядок работы системы автоматического мониторинга предлагается следующий:

- 1) на пункте управления заблаговременно формируются полетные задания для БПЛА, т.е. маршруты, привязанные к географическим объектам и/или координатам;
- 2) пункт управления дает команду на запуск БПЛА, при этом БПЛА вылетают с баз и следуют по маршруту, указанному в полетном задании;
- 3) БПЛА визуально наблюдают за подвижными объектами мониторинга и в режиме потокового видео передают информацию об инциденте на пункт управления;
- 4) пункт управления обнаруживает нарушение (инцидент) в потоковом видео и запрашивает от БПЛА координаты ГЛОНАСС о местонахождении подвижного объекта;
- 5) группа реагирования выезжает на место инцидента, при этом БПЛА продолжает следить за подвижным объектом и передавать актуальную информацию о их местонахождении.

Приведем примеры типовых полетных заданий:

- мониторинг железных дорог на предмет выявления порчи путей;
- мониторинг рек на предмет выявления несанкционированной рыбалки;
- мониторинг периметра охраняемого объекта на предмет приближения групп людей к объекту;
- мониторинг газопроводов на предмет нарушения целостности;
- мониторинг периметра границ лесов на предмет выявления несанкционированных вырубок леса, поджогов, несанкционированной охоты и т.д.

В качестве базы БПЛА может выступать любой пункт управления с соответствующим оборудованием для зарядки и обслуживания БПЛА.

В качестве пункта управления может выступать персональный компьютер, в том числе ноутбук, со стабильным выходом в сеть Интернет. Пункт управления может быть стационарным или мобильным

и перемещаться вместе с группой реагирования. Стационарный пункт управления может обеспечить координацию нескольких групп реагирования по информации от множества БПЛА. Для обеспечения устойчивости системы в нештатных ситуациях в пункте управления должна быть предусмотрена возможность переключения БПЛА с автономного полета на ручное управление.

Для работы системы автоматического мониторинга необходимо обеспечить потоковое видео по каналам мобильной связи (две сим-карты для передачи данных) на территории, на которой развернута система.

Для обеспечения описанного функционала системы необходимо решение задач автономной навигации и автоматического распознавания объектов на изображениях. Автономная навигация может осуществляться с помощью или без помощи GPS/ГЛОНАСС, однако для обеспечения максимального функционала системы необходимо использование визуальной информации. Таким образом, автоматическое распознавание объектов используется как для навигации, так и для выявления сцен и подвижных объектов.

Для решения задач распознавания объектов предполагается использовать технологии машинного обучения и сверточные нейронные сети.

Машинное обучение – область современной математики, изучающая и развивающая подходы по разработке математических алгоритмов, при которых структура алгоритма разрабатывается человеком, а оптимальные параметры алгоритма подбираются в результате специальных вычислений. Процесс подбора оптимальных параметров алгоритма также называется машинным обучением. Как правило, алгоритмы, генерируемые в процессе машинного обучения, называют искусственными нейронными сетями, или просто нейросетями.

Алгоритмы, генерируемые в результате машинного обучения, могут содержать более миллиарда параметров. Поскольку подбор такого числа параметров не под силу человеку, применение машинного обучения позволило создавать алгоритмы, по функционалу и качеству превосходящие любые ранее разработанные человеком.

Процесс машинного обучения с математической точки зрения представляет собой применение так называемого градиентного спуска [5]. Для его применения необходимо наличие большого числа типовых данных, называемых «датасетом».

Датасет представляет собой набор данных с разметкой. Если нейросеть создается для решения задачи компьютерного зрения, то данные в датасете будут представлять собой изображения, если для задачи обработки текста, то данные будут представлять собой тексты, и т.д. Разметка представляет собой специальным образом оформленную информацию о том, какую задачу должен решать алгоритм, создаваемый в результате машинного обучения [6]. Например, если задача состоит в обнаружении типовых объектов на фото, то разметка будет представлять собой информацию о том, на каких изображениях датасета, где расположены, какого размера и класса интересующие объекты. В процессе градиентного спуска происходит постепенное математическое обобщение полученной из датасета информации и сохранение ее в виде параметров создаваемого алгоритма, называемых «весами».

На рис. 2 приведена схема типичного процесса машинного обучения сверточной нейросети для решения задачи компьютерного зрения.

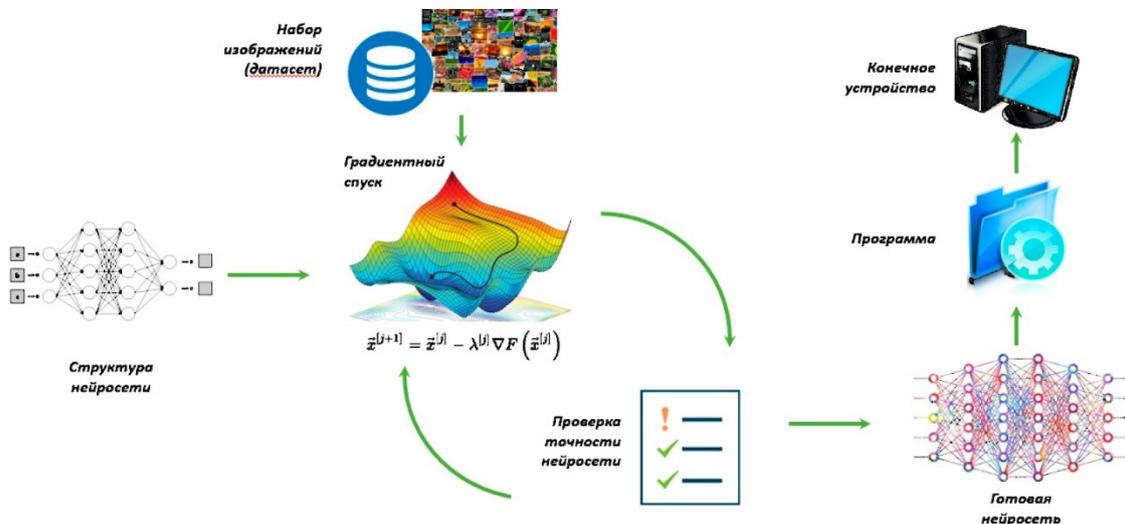


Рис. 2. Схема типичного процесса машинного обучения нейросети

Типовой процесс применения машинного обучения нейросети следующий:

- 1) специалист берет готовую структуру нейросети или подготавливает ее самостоятельно;
- 2) специалист подготавливает датасет;
- 3) запускается процесс градиентного спуска, после нескольких его итераций проверяется, с какой точностью работает создаваемая нейросеть;
- 4) по достижении удовлетворительной точности созданная нейросеть сохраняется, такая нейросеть обладает структурой и набором оптимальных весов;
- 5) сохраненная нейросеть используется в некоторой программе, принимающей на вход обрабатываемые данные и выдающей на выход результаты обработки с помощью нейросети;
- 6) программа с нейросетью эксплуатируется в конечном устройстве.

### Результаты и обсуждение

Точность нейросети, получаемой в процессе машинного обучения, зависит от объема и качества датасета. Для успешного выполнения машинного обучения датасет должен обладать следующими качествами:

– человек, не знакомый с постановкой задачи, должен быть способен без дополнительной информации, используя только разметку датасета, понять, какую задачу будет решать нейросеть (например, по набору изображений и разметке понять, что от нейросети требуется определять нарушение целостности газопровода);

– человек, изучивший разметку, должен быть способен без дополнительных знаний решить для выданного ему образца данных ту же задачу, которую предполагается решать с помощью нейросети (например, если от нейросети требуется определять нарушение целостности газопровода, то человек, изучивший датасет, должен быть способен самостоятельно определять нарушение целостности газопровода на любом изображении);

– разметка датасета должна включать не только объекты, представляющие интерес, но также и объекты, схожие с ними (например, если от нейросети требуется распознавать в толпе человека в камуфляже, то в датасете должны быть как люди в камуфляже, так и люди без камуфляжа, и они должны быть разграничены в разметке);

– данные в датасете должны быть по качеству такими же, как данные, которые предполагается обрабатывать нейросетью (например, изображения не должны быть синтетическими, отличаться качеством съемки, содержать только упрощенные сцены);

– данные в датасете должны быть настолько же разнообразны, насколько могут быть разнообразны данные, обрабатываемые нейросетью (например, если нейросеть должна распознавать людей на видео на улицах круглый год в любое время суток, то датасет должен содержать фотографии всех времен года при любом освещении).

Как правило, для выбора начальной структуры нейросети, настройки процесса градиентного спуска, выбора особенностей разметки и приспособления нейросети к запуску на конкретном конечном устройстве нужны соответствующие специалисты по машинному обучению. Однако существуют технологии и подходы, позволяющие упростить и автоматизировать процесс, сделав его доступным людям без специальной квалификации с применением программного комплекса, позволяющего автоматически генерировать нейросеть для заданного датасета и условия использования нейросети.

В рамках проектируемой сложной системы автоматического мониторинга могут решаться следующие задачи компьютерного зрения: классификация, детекция и семантическая сегментация.

Классификация представляет собой отнесение изображения в целом к одному из заранее известных классов.

Детекция подразумевает, что на изображении могут находиться несколько объектов, для каждого из которых нужно определить положение, размер и класс.

Семантическая сегментация используется в случае, когда интерес представляют не объекты заданной формы, а характерные зоны на изображениях произвольной формы.

На рис. 3 и 4 приведены примеры решения задач детекции и семантической сегментации соответственно.

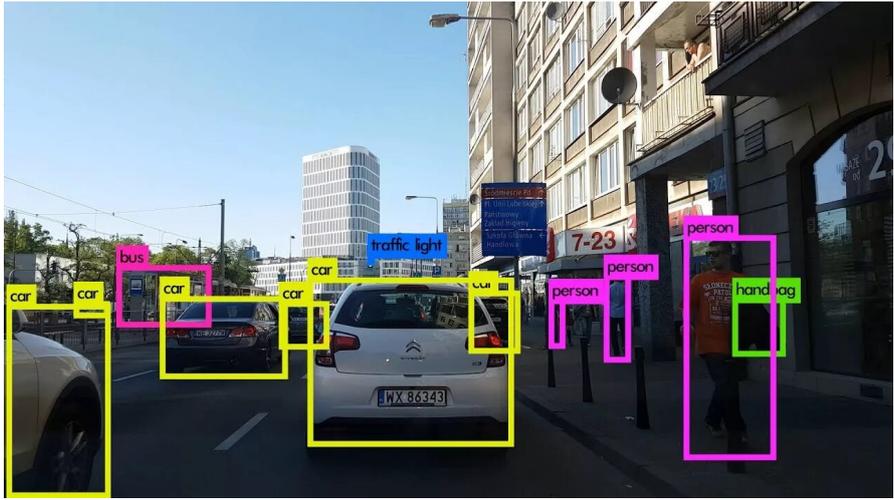


Рис. 3. Детекция участников дорожного движения



Рис. 4. Семантическая сегментация наблюдаемой обстановки в поле зрения БПЛА

Для всех задач применимы различные модификации сверточных нейронных сетей. Структурно все сверточные нейросети схожи и работают по следующему принципу:

- как правило, нейросеть состоит из 10–200 последовательных операций (так называемых «слоев»);
- каждый слой выполняет сравнение нескольких пикселей из точки изображения с шаблонами и формирует массив данных о том, насколько каждая точка изображения похожа на каждый шаблон;
- следующий сверточный слой использует массив данных предыдущего слоя вместо изображения;
- при машинном обучении подбираются оптимальные шаблоны для каждого слоя.

На рис. 5 приведена структура сверточной нейросети Google, передовой в момент своего появления, но в настоящее время редко используемой на практике.

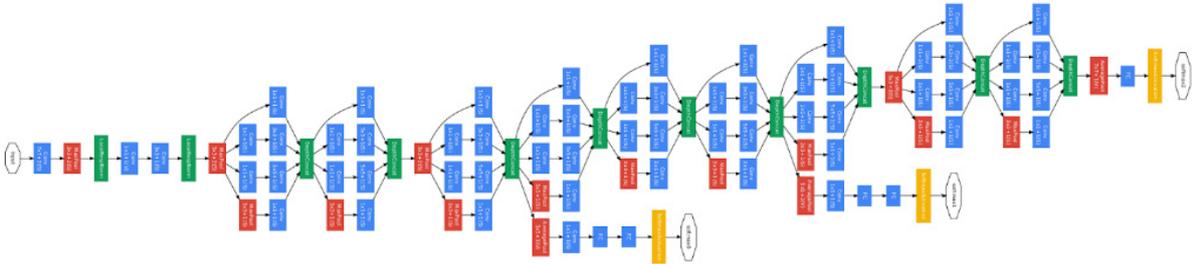


Рис. 5. Структура нейросети GoogleNet

Современные сверточные нейросети содержат несколько миллионов весов и занимают объем памяти до 10 Мбайт, а в редких случаях – больше. Веса нейросети представляют собой числовые коэффициенты шаблонов и не содержат в явном виде фрагментов изображений, использованных в процессе машинного обучения.

Типовые сверточные нейросети обладают вычислительной сложностью менее миллиарда операций умножения со сложением удельно на один фрагмент изображения размером 200×200. В среднем обработка типового видеокadra на приспособленном персональном или серверном компьютере

может выполняться со скоростью несколько сотен изображений в секунду, а на бортовом компьютере – несколько десятков изображений в секунду.

Время машинного обучения сверточной нейросети на персональном компьютере для типовой задачи может составлять от нескольких часов до нескольких суток. Датасеты для машинного обучения содержат от нескольких тысяч до миллионов изображений [7]. На практике для решения задач, в которых обрабатываются последовательные видеокadres, достаточно достижения относительно невысоких значений точности обработки одного изображения, в связи с чем оказывается достаточным использование небольших датасетов, содержащих приблизительно от 1000 изображений на каждый целевой класс и состоящих в целом из нескольких тысяч изображений.

В комплекс предлагаемых технологий также входит использование БПЛА. В настоящее время существует широкий выбор БПЛА, обладающих всем необходимым функционалом для использования в перспективной системе. БПЛА квадрокоптерного типа обладают ограниченной дальностью полета (до 20 км), однако они относительно дешевы (цена 1 штуки может составлять менее 100 000 руб.) и маневренны и могут выполнять фотосъемку с нужной высоты и позиции. БПЛА самолетного типа обладают значительным запасом дальности полета – до 1000 км и более, однако они дороже, а маневрирование для прицельной съемки может быть затруднительно [8, 9]. Оптимальный состав БПЛА для системы должен варьироваться в зависимости от площади и объектов на контролируемой территории и содержать как БПЛА самолетного типа для предварительной разведки и полета на низких дистанциях по линейным маршрутам, так и БПЛА квадрокоптерного типа для более сложных маршрутов и условий съемки, а также для реагирования в случаях оперативно изменяющейся обстановки.

### Заключение

Для машинного обучения нейросетей понадобится найти доступные в сети Интернет или собрать датасеты для типовых задач, например:

- для задачи автономной навигации вдоль железных и автомобильных дорог, газопроводов и рек понадобится датасет с изображением типовой наблюдаемой с высоты полета БПЛА обстановки;
- для задачи обнаружения нарушений на железнодорожных путях понадобится датасет с изображением типовых объектов на железной дороге, в том числе представляющих интерес (группа людей, повреждающая пути) и не представляющих интерес (сотрудники РЖД в жилетах, поезда, вагоны);
- для задачи обнаружения несанкционированной рыбалки на водоемах понадобится датасет с изображением типовых объектов на воде, в том числе представляющих интерес (лодка с людьми и рыболовецкими принадлежностями) и не представляющих интерес (лодка без рыболовецких принадлежностей, скопления плавущих веток);
- для задачи обеспечения целостности газопровода понадобится датасет с изображением типовой обстановки вдоль газопровода, включая объекты, представляющие интерес (возможные нарушения) и не представляющие интерес (обычная обстановка). Датасет должен включать изображения территории вокруг газопровода с высоты полета БПЛА; объекты, представляющие интерес, такие как группа людей, ведущая раскопки, техника (экскаваторы, буровые установки) рядом с трубами, признаки повреждений (утечки газа, трещины, просадки грунта), а также следы несанкционированного доступа (разрытые участки, оголенные трубы); объекты, не представляющие интерес, такие как рабочие газовой компании в спецодежде, специализированные машины для обслуживания газопровода и окружающие объекты (деревья, кустарники, дороги).

Для большинства задач, стоящих перед проектируемой системой мониторинга, состав сцен, представляющих интерес, можно воспроизвести. Таким образом, при необходимости создания датасета с нуля возможно ускорение его создания путем натурального воспроизведения соответствующих сцен интереса (например, для эмуляции порчи железнодорожного полотна можно использовать группу людей в гражданской одежде, находящихся в характерных позах).

В табл. 1 приведен пример характеристик предлагаемой системы мониторинга подвижных объектов на многокилометровой территории.

Разработка предложений по проектированию сложной системы и технологии для автоматического мониторинга подвижных территориально разнесенных объектов требует комплексного подхода, включающего несколько этапов. Рассмотрим ключевые аспекты этого процесса.

Таблица 1

Характеристика	Значение
Максимальная площадь контролируемой территории, км <sup>2</sup>	до 3000
Суммарная протяженность дорог и рек, км	до 500
Длительность цикла полного патрулирования, ч	12–48
Количество баз БПЛА	5–20
Количество пунктов управления	1
Количество сотрудников полиции на дежурстве на пункте управления	0–2
Количество БПЛА самолетного типа суммарно на всех базах (с дальностью полета от 100 км)	1–2
Количество БПЛА квадрокоптерного типа суммарно на всех базах (с дальностью полета 20 км)	10–30
Число оповещаемых персональных устройств сотрудников	не ограничено

*Этап 1. Анализ требований.*

На этом этапе необходимо определить следующие параметры:

- типы объектов: Какие объекты будут отслеживаться? Это могут быть транспортные средства, люди, животные или другие движущиеся элементы;
- требования к точности: Какая точность необходима для определения местоположения объектов?
- частота обновления данных: Как часто нужно обновлять данные о положении объектов?
- зона покрытия: Какой размер территории требуется контролировать?
- условия эксплуатации: В каких условиях будет использоваться система? Например, в городских условиях, сельской местности, экстремальных климатических зонах и т.д.

*Этап 2. Выбор технологий.*

Для создания эффективной системы мониторинга могут потребоваться различные технологии:

- беспилотные летательные аппараты для охвата больших площадей и оперативного сбора информации;
- спутниковые системы для глобального покрытия и постоянного наблюдения;
- радиолокационные станции для обнаружения и слежения за объектами на расстоянии;
- система GPS/ГЛОНАСС для точного определения координат объектов;
- камеры видеонаблюдения для визуальной идентификации и анализа поведения объектов;
- интернет вещей (IoT) для интеграции всех устройств в единую сеть и обмена данными в режиме реального времени [10].

*Этап 3. Проектирование архитектуры системы.*

Архитектура системы должна учитывать взаимодействие всех компонентов и обеспечивать надежную передачу данных между ними. Основные компоненты системы могут включать:

- сенсорный слой: устройства, собирающие данные об объектах (камеры, радары, датчики);
- передающий слой: системы связи, обеспечивающие передачу данных от датчиков к центральному узлу обработки;
- обрабатывающий слой: серверы и программное обеспечение для анализа поступающих данных и принятия решений;
- интерфейсный слой: средства отображения информации и взаимодействия с оператором (панели управления, мобильные приложения).

*Этап 4. Разработка программного обеспечения.*

Программное обеспечение должно обеспечить эффективное управление системой, а также выполнение следующих задач:

- обработку и фильтрацию данных от сенсоров;
- автоматическое обнаружение и идентификацию объектов;
- прогнозирование траекторий движения объектов;
- оповещение оператора о значимых событиях;
- хранение и анализ исторических данных.

*Этап 5. Тестирование и внедрение.*

После разработки системы необходимо провести ее тестирование в реальных условиях. Важно проверить работоспособность всех компонентов, корректность передачи данных и соответствие требованиям заказчика. После успешного тестирования система может быть внедрена в эксплуатацию.

Создание системы автоматического мониторинга подвижных территориально разнесенных объектов является сложным процессом, требующим привлечения специалистов различного профиля: инженеров, программистов, аналитиков и операторов. Правильно спроектированная и реализованная система способна существенно повысить эффективность контроля над территорией и обеспечить своевременное реагирование на любые изменения.

### Список литературы

1. Калиев Д. И., Швец О. Я. Система разведки и мониторинга лесных пожаров на базе // Труды университета. 2023. № 3. С. 103–108. doi: 10.52209/1609-1825\_2023\_3\_103
2. Колесников В. М., Якунин М. А. Перспективы использования БПЛА для экологического мониторинга и безопасной эксплуатации нефтегазопроводов // Человек. Общество. Инклюзия (Приложение). 2023. № S1-1. С. 211–216.
3. Кубасов И. А., Сушков В. И. Анализ зарубежных инновационных подходов к применению беспилотных воздушных судов в правоохранительной деятельности // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2023. № 1. С. 64–71.
4. Кубасов И. А., Сушков В. И. О концептуальном подходе к развитию и применению беспилотных авиационных систем специального назначения // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2023. № 4. С. 86–95.
5. Мартынов А. В., Кандыба В. Е. Метод градиентного спуска в машинном обучении // Шаг в науку. 2022. № 4. С. 4–8.
6. Заславский М. М., Крыжановский К. Е., Иванов Д. В. Разработка системы экологического мониторинга на базе технологий пространственной разметки и машинного обучения // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 56–69. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-56-69
7. Иванов А. И., Кубасов И. А. Сильный искусственный интеллект: повышение качества нейросетевых решений с переходом к обработке входных данных большого объема // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 9–16. doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-1
8. Кубасов И. А., Сушков В. И. О расширении функциональных возможностей беспилотных авиационных систем на основе искусственного интеллекта // Беспилотные воздушные суда в практической деятельности правоохранительных органов : сб. докл. науч.-практ. спец. конф. в рамках Междунар. воен.-техн. форума (Кубинка, Московская обл., 16–18 августа 2022 г.) / под общ. ред. А. А. Морева. М. : НПО «Специальная техника и связь» МВД РФ, 2022. С. 30–32.
9. Кубасов И. А., Сушков В. И. Применение технологий искусственного интеллекта в робототехнических комплексах специального назначения в целях обеспечения правоохранительной деятельности // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2022. № 3. С. 69–76.
10. Кубасов И. А. Промышленный Интернет вещей как революционный скачок развития // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 83–89. doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-9

### References

1. Kaliev D.I., Shvets O.Ya. The system of forest fire exploration and monitoring on the base. *Trudy universiteta = Proceedings of the University*. 2023;(3):103–108. (In Russ.). doi: 10.52209/1609-1825\_2023\_3\_103
2. Kolesnikov V.M., Yakunin M.A. Prospects of using UAVs for environmental monitoring and safe operation of oil and gas pipelines. *Chelovek. Obshchestvo. Inklyuziya (Prilozhenie) = Human. Society. Inclusion (Application)*. 2023;(S1-1):211–216. (In Russ.)
3. Kubasov I.A., Sushkov V.I. Analysis of foreign innovative approaches to the use of unmanned aircraft in law enforcement. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii = Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2023;(1):64–71. (In Russ.)
4. Kubasov I.A., Sushkov V.I. On a conceptual approach to the development and application of unmanned aircraft systems for special purposes. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii = Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2023;(4):86–95. (In Russ.)
5. Martynov A.V., Kandyba V.E. Gradient descent method in machine learning. *Shag v nauku = A step into science*. 2022;(4):4–8. (In Russ.)
6. Zaslavskiy M.M., Kryzhanovskiy K.E., Ivanov D.V. Development of an environmental monitoring system based on spatial marking and machine learning technologies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics*. 2023;26(4):56–69. (In Russ.). doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-56-69
7. Ivanov A.I., Kubasov I.A. Strong artificial intelligence: improving the quality of neural network solutions with the transition to processing large-volume input data. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):9–16. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-1

8. Kubasov I.A., Sushkov V.I. On expanding the functionality of unmanned aircraft systems based on artificial intelligence. *Bespilotnye vozdushnye suda v prakticheskoy deyatel'nosti pravookhranitel'nykh organov: sb. dokl. nauch.-prakt. spets. konf. v ramkakh Mezhdunar. voen.-tekhn. foruma (Kubinka, Moskovskaya obl., 16–18 avgusta 2022 g.) = Unmanned aircraft in the practical activities of law enforcement agencies : collection of scientific and practical reports. special conference within the framework of the International military-technical Forum (Kubinka, Moscow region, August 16-18, 2022)*. Moscow: NPO «Spetsial'naya tekhnika i svyaz'» MVD RF, 2022:30–32. (In Russ.)
9. Kubasov I.A., Sushkov V.I. Application of artificial intelligence technologies in special-purpose robotic complexes in order to ensure law enforcement activities. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii = Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2022;(3):69–76. (In Russ.)
10. Kubasov I.A. Industrial Internet of Things as a revolutionary development leap. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):83–89. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-9

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Игорь Анатольевич Кубасов

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры информационных технологий,  
Академия управления Министерства  
внутренних дел Российской Федерации  
(Россия, г. Москва,  
ул. Зои и Александра Космодемьянских, 8)  
E-mail: igorak@list.ru

#### Igor A. Kubasov

Doctor of technical sciences, associate professor,  
professor of the sub-department  
of information technologies,  
Academy of Management of the Ministry of Internal  
Affairs of the Russian Federation  
(8 Zoi i Aleksandra Kosmodem'yanskikh street,  
Moscow, Russia)

#### Людмила Антоновна Лекарь

кандидат технических наук,  
доцент кафедры информационных технологий,  
Академия управления Министерства  
внутренних дел Российской Федерации  
(Россия, г. Москва,  
ул. Зои и Александра Космодемьянских, 8)  
E-mail: antonna47@bk.ru

#### Lyudmila A. Lekar

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of information technologies,  
Academy of Management of the Ministry of Internal  
Affairs of the Russian Federation  
(8 Zoi i Aleksandra Kosmodem'yanskikh street,  
Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 25.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 05.05.2025**

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА СУГЕНО В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АВИАЦИОННЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Чан Минь Хай<sup>1</sup>, Ку Тхань Фонг<sup>2</sup>, Нгуен Тхе Тханг<sup>3</sup>,  
Нгуен Тхань Санг<sup>4</sup>, Н. К. Юрков<sup>5</sup>, Фам Ван Ту<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Академия противовоздушной обороны и Военно-воздушных сил Вьетнама, Ханой, Вьетнам

<sup>5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>6</sup> Войска противовоздушной обороны и Военно-воздушных сил Вьетнама, Ханой, Вьетнам

<sup>1</sup> minhhai.kq80@gmail.com, <sup>2</sup> thanhphongkshk@gmail.com, <sup>3</sup> thethang.pkkq@gmail.com,

<sup>4</sup> thanhsang8227@gmail.com, <sup>5</sup> yurkov\_NK@mail.ru, <sup>6</sup> phamvantu15a@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальной в современном мире является проблема повышения помехоустойчивости, скрытности, надежности, пропускной способности и дальности действия наземных и бортовых радиоэлектронных систем (РЭС), а также определение величин остаточного ресурса. Техническое состояние радиотехнических систем зависит от множества факторов, основные из которых будем учитывать. Зная нормативные значения диагностических параметров узлов и агрегатов, можно прогнозировать остаточный ресурс системы, т.е. ее наработку от момента технического диагностирования параметра до момента получения им предельного значения. *Материалы и методы.* Рассматривается применение алгоритма нечетко-логического вывода Сугено – Кана для оценки остаточного ресурса для авиационных радиотехнических средств. *Результаты.* Изложено теоретическое представление нечеткой логики, остаточного ресурса и применение алгоритмов логико-нечеткого вывода для решения задач продления и прогнозирования остаточного ресурса авиационных радиотехнических устройств. *Выводы.* Получены технические рекомендации для практических приложений продления и прогнозирования остаточного ресурса технических изделий.

**Ключевые слова:** нечеткий логический вывод, алгоритмы, продление, прогнозирование, остаточный ресурс, радиотехнические средства

**Для цитирования:** Хай Чан Минь, Фонг Ку Тхань, Тханг Нгуен Тхе, Санг Нгуен Тхань, Юрков Н. К., Ту Фам Ван. Применение алгоритма нечеткого логического вывода Сугено в задаче прогнозирования остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 15–25. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-2

## APPLICATION OF SUGENO FUZZY INFERENCE ALGORITHM IN THE PROBLEM OF PREDICTING THE RESIDUAL LIFE OF AVIATION RADIOTECHNICAL EQUIPMENT

Trần Minh Hải<sup>1</sup>, Ku Thanh Phong<sup>2</sup>, Nguyen The Thang<sup>3</sup>,  
Nguyễn Thanh Sáng<sup>4</sup>, N.K. Yurkov<sup>5</sup>, Phạm Văn Tú<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Vietnam Air Defense and Air Force Academy, Hanoi, Vietnam

<sup>5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>6</sup> Vietnam Air Defense and Air Force Service, Hanoi, Vietnam

<sup>1</sup> minhhai.kq80@gmail.com, <sup>2</sup> thanhphongkshk@gmail.com, <sup>3</sup> thethang.pkkq@gmail.com,

<sup>4</sup> thanhsang8227@gmail.com, <sup>5</sup> yurkov\_NK@mail.ru, <sup>6</sup> phamvantu15a@gmail.com

**Abstract.** *Background.* The problem of increasing noise immunity, secrecy, reliability, throughput and range of ground and airborne electronic systems (RES), as well as determining the values of the residual resource, is relevant in the modern world. The technical condition of radio engineering systems depends on many factors, the main ones of which will be taken into account. Knowing the standard values of the diagnostic parameters of units and assemblies, it is possible to predict the residual resource of the system, i.e. its operation from the moment of technical diagnostics of the parameter until the moment it receives the limit value. *Materials and methods.* The paper considers the application of the Sugeno-Kan fuzzy-logical inference algorithm for assessing the residual resource for aviation radio engineering equipment. *Results.* The paper presents a theoretical representation of fuzzy logic, residual resource and the application of fuzzy-logical inference algorithms for solving the problems of extending and predicting the residual resource of aviation radio engineering devices. *Conclusions.* Technical recommendations for practical applications of extending and predicting the residual resource of technical products are obtained.

**Keywords:** fuzzy logical inference, algorithms, extension, forecasting, residual resource, radio engineering means

**For citation:** Hải Trần Minh, Phong Ku Thanh, Thang Nguyen The, Sáng Nguyễn Thanh, Yurkov N.K., Tú Phạm Văn. Application of sugeno fuzzy inference algorithm in the problem of predicting the residual life of aviation radiotechnical equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(2):15–25. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-2

## Введение

В настоящее время во многих странах эксплуатируются различные типы радиотехнических средств для гражданской и военной авиации. Возрастающие требования к повышению помехоустойчивости, скрытности, надежности, пропускной способности и дальности действия наземных и бортовых радиоэлектронных систем (РЭС) требуют особого внимания к эффективности технического обслуживания и прогнозирования остаточного ресурса всех элементов и комплексов РЭС. Эффективное использование радиолокационной (обзорный радиолокатор трассовый ОРЛ-Т, обзорный радиолокатор аэродромный ОРЛ-А, автономный вторичный радиолокатор ВРЛ, посадочный радиолокатор РЛС-П, радиолокационная станция обзора летного поля РЛС ОЛП) и радионавигационной (автоматический радиопеленгатор АРП, наземный всенаправленный ОВЧ-радиомаяк азимутальный РМА (VOR-маяк), наземный всенаправленный УВЧ-радиомаяк дальномерный РМД (DME-маяк), радиотехническая система ближней навигации РСБН, отдельная приводная радиостанция ОПРС, курсовой радиомаяк КРМ, глиссадный радиомаяк ГРМ, маркерный радиомаяк МРМ, дальняя приводная радиостанция ДПРС, ближняя приводная радиостанция БПРС) информации, а также авиационной электро-связи (передающий радиоцентр ПРЦ, приемный радиоцентр ПМРЦ и радиобюро; автономный ретранслятор авиационной подвижной воздушной связи АРТР, центр коммутации сообщений ЦКС) необходимо для обеспечения безопасности полетов воздушных судов (ВС) [1–4].

Как известно, техническое состояние радиотехнических систем при их эксплуатации зависит от различных факторов, не поддающихся предварительному учету. Зная нормативные значения диагностических параметров узлов и агрегатов, можно прогнозировать *остаточный ресурс* системы, т.е. ее наработку от момента технического диагностирования параметра до момента получения им предельного значения.

Прогнозирование остаточного ресурса проводится с целью определения наработки средств и систем с момента технического диагностирования его состояния до достижения им предельного состояния с заданной вероятностью безотказной работы.

В общем случае выбор метода прогнозирования остаточного ресурса должен обосновываться точностью и достоверностью полученных данных, а также требованиями точности и достоверности прогнозируемого ресурса объекта и риска его дальнейшей эксплуатации, наличия и надежности системы контроля его технического состояния.

Основой прогнозирования остаточного ресурса служит следующая информация: диагностические данные о состоянии объекта; данные о режиме и условиях эксплуатации; априорная информация о процессах, ограничивающих ресурс.

Номенклатура параметров технического состояния должна содержать:

- наименование параметра;
- принадлежность его к параметрам, описывающим групповые или индивидуальные особенности исследуемого объекта;
- способ измерения параметра;
- характеристику погрешности измерения параметра.

## Остаточный ресурс авиационных радиотехнических средств с применением алгоритмов нечеткого логического вывода

### *Остаточный срок службы авиационных радиотехнических средств (АРТС)*

Распределение остаточного срока службы оцениваемого АРТС и, соответственно, кривая выживаемости, характеризующая вероятностный процесс выбытия АРТС данного класса, доживших до данного возраста, могут быть рассчитаны, исходя из условного распределения вероятностей. Условная плотность логарифмически нормального распределения остаточного срока службы, выраженного в относительных единицах, отвечающая условию, что АРТС дожил до возраста  $\tau$ , определяется следующим образом [5, 6]:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{(\lg t - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \dots, t > \frac{\tau}{\tau_N}, \\ 0, \dots, t \leq \frac{\tau}{\tau_N}. \end{cases} \quad (1)$$

Дальнейшие расчеты и соответствующие графики [7–9] построены в предположении, что коэффициент вариации  $\rho = 0,3$  и допустимый уровень выбытия АРТС из эксплуатации до достижения ими нормативного срока  $\alpha = 0,1$ .

Зная плотность распределения остаточного срока службы (1), можно определить среднее значение остаточного срока службы  $T$  (в относительных единицах) при условии, что АРТС уже эксплуатировался некоторое время ( $t$ ).

При эксплуатации технических систем и изделий используют следующие методы прогнозирования остаточного ресурса основных агрегатов и узлов по реализации:

1) прямые (метод временных рядов, метод степенных функций, метод дробно-линейных функций, экспоненциальный метод, логарифмический метод, метод среднестатистических закономерностей параметра, линейный метод и др.);

2) системные (дифференциальный метод, по энергетическим параметрам, метод построения математических моделей, адаптационное прогнозирование и др.) [10].

Чаще всего используются методики, позволяющие провести прогнозирование остаточного ресурса по диагностическим параметрам на основе определения статистических взаимосвязей между структурными и диагностическими параметрами технических систем. а также при наличии адекватных статистических моделей изменения данных их параметров во времени.

На системном уровне учитывается не только изменение диагностических параметров и их взаимосвязи, а также и влияние внешних факторов. Если не принимать во внимание внешние условия, то чаще всего используются подходы, основанные на экстраполяции ресурса.

Признаки предельного состояния оборудования, установленные нормативно-технической документацией, являются критериями предельного состояния. Одним из таковых является остаточный ресурс – запас возможной наработки оборудования после момента контроля его технического состояния (или ремонта), в течение которого обеспечивается соответствие требованиям нормативно-технической документации всех его основных технико-экономических показателей.

Для принятия обоснованных решений необходимо иметь достаточную информацию о нагруженности основных и наиболее напряженных элементов в течение всего предыдущего периода эксплуатации, а также об изменении технического состояния этих элементов.

Диагностирование предельного технического состояния и прогнозирование величины остаточного ресурса может быть надежно осуществлено при одновременном выполнении следующих условий [6, 7]:

- известны параметры технического состояния (ПТС) оборудования;
- известны критерии предельного состояния оборудования;
- имеется возможность периодического (или непрерывного) контроля значений ПТС.

Информативными параметрами для прогнозирования и расчета остаточного ресурса также могут быть:

- величины возникающих повреждений (глубина коррозии, величина эрозионного или механического износа);
- параметры сопутствующих процессов (уровни вибрации агрегатов, величины утечек в уплотнениях, температура узлов трения и др.);
- технологические параметры (давление, температура, расход продукта);
- показатели качества и эффективности функционирования оборудования (производительность, расход электроэнергии, коэффициент полезного действия и т.п.).

В общем случае для выбора наиболее информативных параметров составляется полный перечень предельных состояний оборудования и соответствующих контролируемых параметров, связанных с каждым предельным состоянием.

Для расчета предельного срока службы при наличии достаточной статистической базы данных используются классические методы графической экстраполяции [6].

**Нечетко-логический подход к оценке остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств**

Для автоматизированной оценки состояния узлов авиационных радиотехнических средств (АРТС) используются экспертные системы, основанные на знаниях и нечеткой логике [11, 12]. Известные экспертные системы используют продукционную модель представления знаний, что позволяет прогнозировать отказы АРТС и определять причины, из-за которых возникли отказы, за счет получения и сопоставления трендов, полученных с участков временного ряда значений измеряемых параметров функционирования оборудования, с определенным набором правил для допустимых изменений этих параметров. Основной трудностью при разработке подобных экспертных систем является формирование требуемой базы знаний, основанной на опыте экспертов и данных о прошедших отказах АРТС.

Существующие методики и стандарты [5–7] в области прогнозирования остаточного ресурса АРТС требуют наличия большого объема вводных и статистических данных (совокупность сведений о состоянии оборудования, его узлов и агрегатов, а также параметрах, тенденциях и закономерностях происходящих процессов) для расчета.

Шкалы оценки состояния АРТС (неработоспособное, неисправное, ограниченно работоспособное, работоспособное, недопустимое, аварийное) являются средством адекватного сопоставления и определения численных значений отдельных свойств и качеств различных систем АРТС.

Применительно к решению задач оценки технического состояния АРТС и прогнозирования их работоспособности при использовании централизованных систем технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) может быть использована экспертная система с применением алгоритмов нечетко-логического вывода. Это объясняется следующим обоснованием [13–16]:

- нечеткая логика дает возможность достаточно просто заложить информацию об объекте в виде нечетких правил, которые более близки к естественному языку и понятны;
- при привлечении экспертов (специалистов, связанных с эксплуатацией и ремонтом оборудования) увеличится и вероятность того, что диагностическая информация и прогноз состояния оборудования будут ближе к истине;
- нечеткие модели оказываются более простыми для реализации по сравнению с классическими алгоритмами оценки и прогнозирования технического состояния сложных технических систем;
- правила нечеткой логики могут быть использованы для построения структуры нейроподобной сети;
- результаты вывода нечеткой экспертной системы в задачах прогнозирования и диагностирования объекта могут быть использованы в качестве обеспечивающей системы ТО и Р для принятия решений, а также интегрированы в ЕАМ/ERP системы и др.

База знаний представляет собой набор правил для конкретных производственных условий и учитывает влияние тех или иных АРТС. В данном случае задача системы нечеткого вывода состоит в том, чтобы, руководствуясь базой правил для фактических значений входных переменных (экспертных оценок, системы АРТС и др.), определить основные параметры плотности распределения ресурса (область нечетких отказов). Таким образом, возможно сузить или расширить интервал нечеткого отказа. Распределение Вейбулла применяют при описании надежности сложных технических систем [5–7]. Это распределение является двухпараметрическим универсальным законом, так как при изменении параметров оно в пределе может описывать нормальное распределение, логнормальное распределение, экспоненциальное распределение и др.

**Теоретическое представление нечетких множеств, нечеткой логики  
для алгоритмов нечеткого логического вывода**

По определению [17, 18], нечетким множеством (fuzzy set)  $A$  на универсальном множестве  $U$  называется совокупность пар  $(\mu_A(u), u)$ , где  $\mu_A(u)$  – степень принадлежности (число из диапазона  $[0, 1]$ ) элемента  $u \in U$  к нечеткому множеству  $A$ .

Функцией принадлежности (membership function)  $\mu_A(u)$  возможно вычислить степень принадлежности произвольного элемента  $u \in U$  универсального множества к нечеткому множеству  $A$ . Функции принадлежности имеют различные формы, типичными из которых являются кусочно-

линейные (треугольные, трапециевидные),  $Z$ -образные и  $S$ -образные (или сплайн-функции) функции принадлежности.  $Z$ -образная кривая используется для представления таких свойств нечетких множеств, характеризующихся неопределенностью типа: «малое количество», «небольшое значение», «незначительная величина», «низкий уровень» и др. (т.е. низкая степень проявления того или иного качественного или количественного признака).  $S$ -образные функции используются для представления неопределенностей типа: «высокая норма», «высокий уровень», «большое, значительное значение» и многих других (т.е. высокая степень проявления того или иного качественного или количественного признака).  $\Pi$ -образные функции принадлежности представляют целый класс кривых, которые по своей форме напоминают колокол, сглаженную трапецию или букву «П».

Нечеткая переменная – это кортеж вида  $\langle \alpha, X, A \rangle$ , где  $\alpha$  – имя нечеткой переменной;  $X$  – ее область определения;  $A$  – нечеткое множество на универсуме  $X$ .

Лингвистическая переменная определяется как кортеж

$$\langle \alpha, T, U, G, M \rangle,$$

где  $\alpha$  – название (имя) лингвистической переменной;  $T$  – базовое терм-множество лингвистической переменной или множество ее значений (термов), каждое из которых представляет собой наименование отдельной нечеткой переменной  $\alpha$ ;  $U$  – область определения (универсум) нечетких переменных, которые входят в определение лингвистической переменной  $\alpha$ ;  $G$  – некоторая синтаксическая процедура, которая описывает процесс образования или генерирования из множества  $T$  новых, осмысленных в рассматриваемом контексте значений для данной лингвистической переменной  $\alpha$ ;  $M$  – семантическая процедура, которая позволяет поставить в соответствие каждому новому значению данной лингвистической переменной, получаемому с помощью процедуры  $G$ , некоторое осмысленное содержание посредством формирования соответствующего нечеткого множества.

Терм-множеством (term set) называется множество всех возможных значений лингвистической переменной. Термом (term) называется любой элемент терм-множества.

### ***Нечеткая база знаний***

Правилom нечетких продукций называется классическое правило вида «ЕСЛИ... ТО ...», где в качестве условий и заключений будут использоваться нечеткие высказывания и записываются в форме [19–23]:

$$\text{IF } (\beta_1 \text{ IS } \alpha_1) \text{ AND (OR) } (\beta_2 \text{ IS } \alpha_2) \text{ THEN } (\beta_3 \text{ IS } \alpha_3)$$

или

$$(i) \quad Q; P; A \Rightarrow B; \quad S, F, N,$$

где  $(i)$  – имя нечеткой продукции;  $Q$  – сфера применения нечеткой продукции;  $P$  – условие применимости ядра нечеткой продукции;  $A \Rightarrow B$  – ядро нечеткой продукции, в котором  $A$  – условие ядра (или антецедент);  $B$  – заключение ядра (или консеквент); « $\Rightarrow$ » – знак логической секвенции (или следование);  $S$  – метод или способ определения количественного значения степени истинности заключения ядра;  $F$  – коэффициент определенности или уверенности нечеткой продукции;  $N$  – постусловия продукции.

Продукция ядро  $A \Rightarrow B$  является центральным компонентом нечеткой продукции. Ядро продукции записывается в форме обычной логики: «ЕСЛИ  $A$ , ТО  $B$ » или в виде: «IF  $A$ , THEN  $B$ », где  $A$  и  $B$  – некоторые выражения нечеткой логики, которые наиболее часто представляются в форме нечетких высказываний. При этом секвенция интерпретируется в обычном логическом смысле как знак логического следования заключения  $B$  из условия  $A$ .

$S$  – метод или способ определения количественного значения степени истинности заключения  $B$  на основе известного значения степени истинности условия  $A$ . Данный способ в общем случае определяет так называемую схему или алгоритм нечеткого вывода в продукционных нечетких системах и называется также методом композиции или методом активации.

$F$  – коэффициент определенности или уверенности выражает количественную оценку степени истинности или относительный вес нечеткой продукции. Коэффициент уверенности принимает свое значение из интервала  $[0, 1]$  и часто называется весовым коэффициентом нечеткого правила продукции.

### Подход к решению задач продления и прогнозирования остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств с применением алгоритмов нечеткого логического вывода

Для оценки остаточного ресурса радиотехнических средств обычно используют метод аналитического прогнозирования, задачей которого является получение аналитических выражений для оценки значений прогнозируемых параметров в будущий момент времени  $t$  или момент времени, когда параметр технического состояния достигает предельного значения. Если техническое состояние описывается несколькими параметрами, то используют понятие *обобщенного многомерного вектора состояния*  $x(t) = \{x_1, x_2, \dots\}$ .

Индивидуальный прогноз объекта исследования основан на знании математического ожидания  $M_y$  и условной дисперсии величины  $x$  в моменты времени, предшествующие моменту обследования  $x(t_i)$ ,  $i = 1, N$ , и принимаемой модели развития этого процесса.

Рассматриваемый процесс представляют в виде сочетания регулярной и случайной составляющих:  $x(t) = y(t, j) + z(t)$ .

Предполагается, что регулярная составляющая  $y\{t, j\}$  представляет гладкую функцию времени, описываемую конечно-мерным вектором параметров  $j$ . Эта составляющая имеет ряд синонимов: тренд, уровень, тенденция, детерминированная основа процесса.

Случайная составляющая  $z(t)$  принимается некоррелируемым случайным процессом с нулевым математическим ожиданием.

Наибольшее применение нашли следующие аппроксимирующие функции:

- линейная модель вида  $y(t) = y_0 + Ct$ . Эта модель хорошо описывает кинетику разрушения металлов при общей коррозии и разных видах механического изнашивания;
- степенная модель  $y(t) = Ct^m$ . Модель применяется при описании многих видов коррозии (сплошной, локальной), а также при коррозии под напряжением и при изнашивании;
- логарифмическая зависимость  $y(t) = A \ln(t + C)$ . Она хорошо описывает кинетику газовой и локальной коррозии;
- экспоненциальная модель  $y(t) = C \exp[T(t)]$ . Применяется при описании общей коррозии под напряжением.

В качестве основного показателя остаточного ресурса в результате прогноза определяется *гамма-процентный ресурс*, задаваемый двумя численными параметрами: наработкой и выраженной в процентах вероятностью того, что в течение этой наработки предельное состояние не будет достигнуто. При отсутствии второго показателя величина наработки считается *назначенной*.

В статистических методах оценки ресурса по результатам исследования партии изделий гамма-процентный ресурс определяется по кривой распределения ресурсного показателя. При отсутствии закона распределения используют непараметрические методы оценки надежности.

В экстраполяционных методах определения ресурса единичного объекта ожидаемый ресурс определяется при достижении  $y(t)$  предельной величины. Если параметр  $x$  неравномерно распределен по поверхности (например, глубина и площадь коррозионного разрушения), то определяют функцию распределения этой величины и находят доверительные нижнюю и верхнюю границы ресурсного показателя, задаваясь величиной гамма. При этом полагают, что закон распределения в начале и конце прогнозируемого интервала времени не изменяется.

Общая типовая методика прогнозирования технического состояния оборудования содержит следующие этапы исследования:

- определение стратегии прогноза (определение цели, задач, интервала упреждения, рабочих гипотез, методов и организации исследования);
- прогностический фон (сбор информации о методах прогнозирования по схожим с объектом исследования объектам);
- разработка системы параметров, отображающей характер и структуру объекта;
- разработка поисковой модели (проекции в будущее системы показателей модели на дату упреждения по наблюдаемой тенденции с учетом факторов прогностического фона);
- разработка нормативной модели (проекции в будущее системы показателей модели в соответствии с заданными целями и нормами по заданным критериям);
- оценка степени достоверности (верификации) и уточнения предварительных моделей с помощью параллельных контрольных методов (опросом экспертов, математическим экспериментом);
- выработка рекомендаций для оптимизации принятия решения в планировании и управлении эксплуатацией оборудования на основе прогностических моделей.

При прогнозировании остаточного ресурса прежде всего необходимо установить закономерности достижения диагностическими и структурными параметрами их предельных значений, а также определить критерии технического состояния. Этот процесс основывается на изменении технического состояния исследуемых технических систем, функционирующих в условиях неопределенности. При этом эффективным аппаратом расчета остаточного ресурса технических систем и изделий является нечеткий логический вывод [24, 25].

Используется функция состояния [24, 25], характеризующая качество исследуемых систем и изделий диагностирования через их производительность – внесистемная величина, равная отношению объема проделанной работы ко времени, за которое она была совершена.

Логичной формой представления всех элементов множеств входов и выходов будут временные ряды, которые предлагается использовать в качестве исходных данных для анализа изменения технического состояния исследуемых систем и изделий.

В рамках нечеткой логики значения любой величины входных данных и выхода представляются термами (значениями терм-множеств). Применительно к оцениванию понятий (лингвистических переменных) технического состояния логично представляются применимыми термы «неработоспособное», «исправное», «аварийное» и «критическое». Для реализации лингвистической переменной необходимо определить точные физические значения ее термов. Предлагается нормировать «техническое состояние» значением из диапазона от 0 до 1:  $Q(t) \in [0;1]$ .

Для выполнения процедуры нечеткого логического вывода представляются импликациями, последовательная композиция которых выполняется с использованием пакета Fuzzy Logic Toolbox for Matlab [26].

В качестве лингвистических переменных в задачах продления и прогнозирования остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств выбираем критерии оценки технического состояния и остаточного ресурса.

Каждому терму лингвистической переменной соответствует нечеткое множество и функция. С помощью функции принадлежности определяются степени принадлежности каждого элемента глобального множества данному терму. Элементами глобального множества являются численные экспертные оценки технического состояния и остаточного ресурса по некоторой шкале.

На вход алгоритма нечеткого вывода подаются четкие значения критерия оценки технического состояния и остаточного ресурса. Выходной переменной системы является лингвистическая переменная «остаточного ресурса» авиационных радиотехнических средств.

Для реализации алгоритма принятия решения с помощью нечеткого вывода необходимо описать правила, по которым осуществляется связь между различными характеристиками и выходным значением полезности альтернатив. Сравнение альтернатив и принятие решения производится с помощью продукционных правил. Каждое продукционное правило состоит из одной или нескольких посылок и заключения. Если посылок несколько, они связываются логическим «И». Продукционное правило имеет вид [27, 28]:

ЕСЛИ посылка [И посылка ...], ТО заключение,

где посылка и заключение являются нечеткими высказываниями.

На основе имеющихся правил делаются соответствующие заключения для выходной переменной. Заключения правил объединяются для получения четких значений переменной полезности. Полученные четкие значения являются численными оценками предпочтительности альтернатив.

Алгоритм нечеткого вывода Сугено (Sugeno) представляется в следующей форме [27, 28]:

если  $x$  есть  $a_1$  и  $y$  есть  $b_1$ , то  $z_1 = a_1x + b_1y$ ;

если  $x$  есть  $a_2$  и  $y$  есть  $b_2$ , то  $z_2 = a_2x + b_2y$ . (2)

Реализуются следующие этапы нечеткого логического вывода:

1) фазификация: находятся степени истинности для предпосылок каждого правила (2):  $a_1(x_0), a_2(x_0), b_1(y_0), b_2(y_0)$ ;

2) вывод: находятся уровни отсечения для предпосылок каждого из правил с использованием операции минимума:

$$\begin{cases} a_1 = a_1(x_0) \wedge b_1(y_0); \\ a_2 = a_2(x_0) \wedge b_2(y_0). \end{cases} \quad (3)$$

Находятся индивидуальные выводы правил:

$$\begin{cases} z_1^* = a_1x + b_1y; \\ z_2^* = a_2x + b_2y; \end{cases} \quad (4)$$

3) определяется четкое значение выходной переменной логического вывода в виде

$$z_0 = \frac{a_1z_1^* + a_2z_2^*}{a_1 + a_2}. \quad (5)$$

Схема алгоритма нечеткого логического вывода Сугено (Sugeno) представлена на рис. 1.

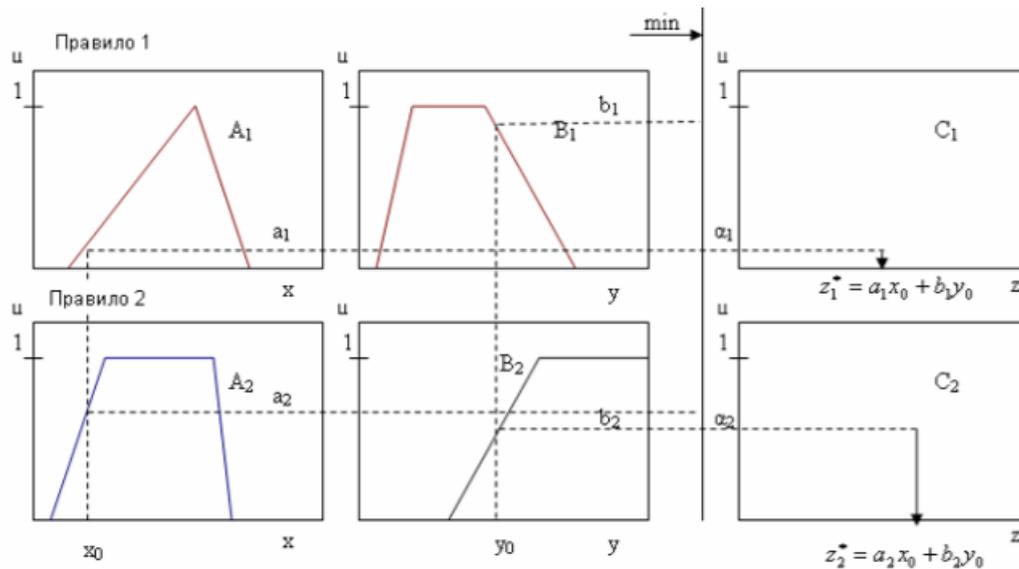


Рис. 1. Алгоритм нечеткого логического вывода Сугено (Sugeno)

### Заключение

Представленный нечетко-логический подход к оценке остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств на примере алгоритма нечеткого логического вывода Сугено (Sugeno), основываясь на теоретическом представлении нечеткой логики, остаточного ресурса и применении алгоритмов логико-нечеткого вывода, используется для решения задач продления и прогнозирования остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств.

Алгоритм нечеткого вывода обеспечивает гибкость системы принятия решения за счет возможности корректировки критериев оценки и правил вывода.

Полученные технические рекомендации приемлемы для практических приложений продления и прогнозирования остаточного ресурса технических изделий.

### Список литературы

1. Ярлыков М. С., Богачев А. С., Меркулов В. И., Дрогалин В. В. Радиозлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 1. Теоретические основы / под ред. М. С. Ярлыкова. М. : Радиотехника, 2012. 504 с.
2. Барбашев П. М., Гаврюшин В. Н., Мощенко А. А., Пипченко И. П. Бортовое радиозлектронное оборудование : учеб. пособие. Иркутск : ИВВАИУ (ВИ), 2007. 246 с.
3. Тихонов В. И. [и др.]. Авиационные системы и комплексы радиосвязи : учебник для слушателей и курсантов вузов ВВС / под ред. В. И. Тихонова. М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2007. 784 с.
4. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / под ред. П. И. Дудника. М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
5. Егишянц С. А., Гулина О. М., Коновалов Э. Н. Оценка распределения ресурса при суммировании повреждений // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 1997. № 1. С. 18–21.
6. Антонов А. В., Никулин М. С. Статистические методы в теории надежности. М. : Абрис, 2012. 390 с.
7. Садыхов Г. С. Остаточный ресурс технических объектов и методы его оценки. М. : Знание, 1986. 50 с.

8. Абрамов О. В. Дестабилизирующие факторы и случайные процессы изменения параметров технических устройств и систем // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 13–20. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-2
9. Морозов В. Б., Морозова М. А. О методах оценки интенсивности отказов оборудования для вероятностного анализа безопасности проектируемой АЭС при объединении данных от различных источников // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 39–48. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-5
10. Воробьев В. Г., Константинов В. Д. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования : учебник. М. : МГТУ ГА, 2010. 448 с.
11. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2003. 736 с.
12. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М. : Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.
13. Дмитриевцев А. Ю., Зырянов Ю. Т., Нестерович С. А., Хрипунов С. П. Постановка задачи оценки технического состояния информационно-измерительных систем на основе формализованного описания знаний экспертов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 113–119. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-13.
14. 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
15. Baldwin J. F. A new approach to approximate reasoning using a fuzzy logic // Fuzzy Sets and Sustersms. 1979. P. 225–251.
16. Kudłacik P. Advantages of an Approximate Reasoning Based on a Fuzzy Truth Value // J. Medical Informatics & Technologies. 2010. Vol. 16. P. 125–132.
17. Заде Л. Нечеткая логика: понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М. : Мир, 1976. С. 167.
18. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта : пер. с пол. М. : Горячая Линия – Телеком, 2010. 520 с.
19. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечёткие системы. М. : Мир, 1993. 368 с.
20. Mamdani E. H. Applications of Fuzzy Algorithm for Control a Simple Dynamic Plant // Proc. IEEE. 1974. Vol. 121, № 12. P. 1585–1588.
21. Larsen P. M., Industrial applications of fuzzy logic control // Int. J. Man Mach. Studies. 1980. Vol. 12, № 1. P. 3–10.
22. Sinuk V. G., Kutsenko D. A. Inference methods for systems with many fuzzy inputs // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2015. Vol. 54. P. 375–383.
23. Tsukamoto Y. An approach to fuzzy reasoning method // Advances in Fuzzy Set Theory and Applications / ed. by M. M. Gupta, R. K. Ragade, R. R. Yager. Amsterdam : NorthHolland, 1979.
24. Мишанов Р. О., Пиганов М. Н. Методика определения набора информативных параметров для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности радиоэлектронных средств // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 1. С. 93–104. doi: 10.21685/2307-4205-2017-1-12
25. 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
26. Тарасян В. С. Пакет Fuzzy Logic Toolbox for Matlab : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2013. 112 с.
27. Рыбанов А. А., Фадеева М. В. Методы анализа нечеткой информации: курс лекций : учеб. пособие. Волжский : Волжский политехнический институт, 2019.
28. Хижняков Ю. Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени : учеб. пособие. Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 156 с.

### References

1. Yarlykov M.S., Bogachev A.S., Merkulov V.I., Drogalin V.V. *Radioelektronnye kompleksy navigatsii, pritselivaniya i upravleniya vooruzheniem letatel'nykh apparatov. T. 1. Teoreticheskie osnovy = Radio-electronic complexes for navigation, aiming and armament control of aircraft. Vol. 1. Theoretical foundations.* Moscow: Radiotekhnika, 2012:504. (In Russ.)
2. Barbashev P.M., Gavryushin V.N., Moshchenko A.A., Pipchenko I.P. *Bortovoe radioelektronnoe oborudovanie: ucheb. posobie = Avionics : a textbook.* Irkutsk: IVVAIU (VI), 2007:246. (In Russ.)
3. Tikhonov V.I. et al. *Aviatsionnye sistemy i kompleksy radiosvyazi: uchebnik dlya slushateley i kursantov vuzov VVS = Aviation systems and radio communication complexes : a textbook for students and cadets of Air Force universities.* Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 2007:784. (In Russ.)
4. Dudnik P.I. (ed.). *Aviatsionnye radiolokatsionnye kompleksy i sistemy = Aviation radar complexes and systems.* Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 2006:1112. (In Russ.)

5. Egishyants S.A., Gulina O.M., Konovalov E.N. Resource allocation assessment in damage summation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika = News of higher educational institutions. Nuclear power engineering*. 1997;(1): 18–21. (In Russ.)
6. Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statisticheskie metody v teorii nadezhnosti = Statistical methods in the theory of reliability*. Moscow: Abris, 2012:390. (In Russ.)
7. Sadykhov G.S. *Ostatochnyy resurs tekhnicheskikh ob"ektov i metody ego otsenki = Residual resource of technical facilities and methods of its assessment*. Moscow: Znanie, 1986:50. (In Russ.)
8. Abramov O.V. Destabilizing factors and random processes of changing the parameters of technical devices and systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1): 13–20. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-2
9. Morozov V.B., Morozova M.A. On methods for assessing the failure rate of equipment for probabilistic safety analysis of a projected NPP when combining data from various sources. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):39–48. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-5
10. Vorob'ev V.G., Konstantinov V.D. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika aviatsionnogo oborudovaniya: uchebnyk = Reliability and technical diagnostics of aviation equipment : textbook*. Moscow: MGTU GA, 2010:448. (In Russ.)
11. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH = Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2003:736. (In Russ.)
12. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB = Design of fuzzy systems using MATLAB*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007:288. (In Russ.)
13. Dmitrievtsev A.Yu., Zyryanov Yu.T., Nesterovich S.A., Khripunov S.P. Setting the task of assessing the technical condition of information and measurement systems based on a formalized description of expert knowledge. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):113–119. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-13
14. 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 system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):120–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
15. Baldwin J.F. A new aproach to approximate reasoning using a fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Sustems*. 1979:225–251.
16. Kudłacik P. Advantages of an Approximate Reasoning Based on a Fuzzy Truth Value. *J. Medical Informatics & Technologies*. 2010;16:125–132.
17. Zade L. *Nechetkaya logika: ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy = Fuzzy logic: the concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions*. Moscow: Mir, 1976:167. (In Russ.)
18. Rutkovskiy L. *Metody i tekhnologii iskusstvennogo intellekta: per. s pol'skogo = Methods and technologies of artificial intelligence : translated from Polish*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2010:520. (In Russ.)
19. Terano T., Asai K., Sugeno M. *Prikladnye nechetkie sistemy = Applied Fuzzy Systems*. Moscow: Mir, 1993:368. (In Russ.)
20. Mamdani E.H. Applications of Fuzzy Algorithm for Control a Simple Dynamic Plant. *Proc. IEEE*. 1974;121(12):1585–1588.
21. Larsen P.M. Industrial applications of fuzzy logic control. *Int. J. Man Mach. Studies*. 1980;12(1):3–10.
22. Sinuk V.G., Kutsenko D.A. Inference methods for systems with many fuzzy inputs. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2015;54:375–383.
23. Tsukamoto Y. An approach to fuzzy reasoning method. *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*. Ed. by M.M. Gupta, R.K. Ragade, R.R. Yager. Amsterdam: NorthHolland, 1979.
24. Mishanov R.O., Piganov M.N. Methodology for determining a set of informative parameters for conducting individual forecasting of quality and reliability indicators of radioelectronic devices. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(1):93–104. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2017-1-12
25. 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 system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):120–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
26. Tarasyan V.S. *Paket Fuzzy Logic Toolbox for Matlab: ucheb. posobie = Fuzzy Logic Toolbox for Matlab : textbook*. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2013:112. (In Russ.)
27. Rybanov A.A., Fadeeva M.V. *Metody analiza nechetkoy informatsii: kurs lektсий: ucheb. posobie = Methods of fuzzy information analysis: a course of lectures : textbook*. Volzhskiy: Volzhskiy politekhnicheskii institut, 2019. (In Russ.)
28. Khizhnyakov Yu.N. *Algoritmy nechetkogo, neyronnogo i neyro-nechetkogo upravleniya v sistemakh real'nogo vremeni: ucheb. posobie = Algorithms of fuzzy, neural and neuro-fuzzy control in real-time systems : textbook*. Perm': Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta, 2013:156. (In Russ.)

**Информация об авторах / Information about the authors****Чан Минь Хай**

кандидат технических наук,  
преподаватель кафедры радиотехники,  
Академия противовоздушной обороны  
и Военно-воздушных сил Вьетнама  
(Вьетнам, г. Ханой)  
E-mail: minhhai.kq80@gmail.com

**Ку Тхань Фонг**

кандидат технических наук,  
преподаватель кафедры радиотехники,  
Академия противовоздушной обороны  
и Военно-воздушных сил Вьетнама  
(Вьетнам, г. Ханой)  
E-mail: thanhphongkshk@gmail.com

**Нгуен Тхе Тханг**

кандидат технических наук,  
преподаватель кафедры радиотехники,  
Академия противовоздушной обороны  
и Военно-воздушных сил Вьетнама  
(Вьетнам, г. Ханой)  
E-mail : thethang.pkkq@gmail.com

**Нгуен Тхань Санг**

кандидат технических наук,  
преподаватель кафедры радиотехники,  
Академия противовоздушной обороны  
и Военно-воздушных сил Вьетнама  
(Вьетнам, г. Ханой)  
E-mail : thanhsang8227@gmail.com

**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

**Фам Ван Ту**

аспирант,  
361-я дивизия,  
Войска противовоздушной обороны  
и Военно-воздушных сил Вьетнама  
(Вьетнам, г. Ханой)  
E-mail: phamvantu15a@gmail.com

**Trần Minh Hải**

Candidate of technical sciences,  
lecturer of the sub-department of radio engineering,  
Vietnam Air Defense and Air Force Academy  
(Hanoi, Vietnam)

**Ku Thanh Phong**

Candidate of technical sciences,  
lecturer of the sub-department of radio engineering,  
Vietnam Air Defense and Air Force Academy  
(Hanoi, Vietnam)

**Nguyen The Thang**

Candidate of technical sciences,  
lecturer of the sub-department of radio engineering,  
Vietnam Air Defense and Air Force Academy  
(Hanoi, Vietnam)

**Nguyễn Thanh Sáng**

Candidate of technical sciences,  
lecturer of the sub-department of radio engineering,  
Vietnam Air Defense and Air Force Academy  
(Hanoi, Vietnam)

**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)

**Phạm Văn Tú**

Postgraduate student,  
361st Division,  
Vietnam Air Defense and Air Force Service  
(Hanoi, Vietnam)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию / Received 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования / Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации / Accepted 05.05.2025**

## МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ПОРАЖАЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ – ПРЕГРАДА»

А. И. Годунов<sup>1</sup>, П. С. Суздальцев<sup>2</sup>, Н. А. Кузин<sup>3</sup>

<sup>1</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>3</sup> Московский автодорожный институт (технический университет), Москва, Россия  
<sup>1</sup> avitelpgu@mail.ru, <sup>2</sup> Suzdal.1990@bk.ru, <sup>3</sup> sputnik1985nk3y@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В современных условиях развитие математических моделей играет ключевую роль в исследовании и проектировании технических систем. Создание адекватных моделей позволяет повысить точность прогнозирования поведения объектов и оптимизировать их характеристики. *Материалы и методы.* Построена математическая модель исследуемого объекта с применением современных вычислительных методов. Используются численные методы расчета и программное обеспечение для моделирования динамических процессов. *Результаты.* Разработанная модель позволяет провести анализ основных параметров системы, определить ее динамические характеристики и влияние внешних факторов на поведение исследуемого объекта. *Выводы.* Предложенный подход к математическому моделированию обеспечивает высокую точность и надежность результатов, что может быть полезно при разработке и совершенствовании технических систем.

**Ключевые слова:** математическая модель, метод конечных элементов, высокоскоростное взаимодействие

**Для цитирования:** Годунов А. И., Суздальцев П. С., Кузин Н. А. Модель высокоскоростного взаимодействия в системе «поражающий элемент – преграда» // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 26–33. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-3

## A MODEL OF HIGH-SPEED INTERACTION IN THE «STRIKING ELEMENT – BARRIER» SYSTEM

A.I. Godunov<sup>1</sup>, P.S. Suzdaltsev<sup>2</sup>, N.A. Kuzin<sup>3</sup>

<sup>1</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>3</sup> Moscow Road Institute (Technical University), Moscow, Russia

<sup>1</sup> avitelpgu@mail.ru, <sup>2</sup> Suzdal.1990@bk.ru, <sup>3</sup> sputnik1985nk3y@mail.ru

**Abstract.** *Background.* In modern conditions, the development of mathematical models plays a key role in the research and design of technical systems. The creation of adequate models makes it possible to increase the accuracy of predicting the behavior of objects and optimize their characteristics. *Materials and methods.* The paper builds a mathematical model of the object under study using modern computational methods. Numerical calculation methods and software for modeling dynamic processes are used. *Results.* The developed model makes it possible to analyze the main parameters of the system, determine its dynamic characteristics and the influence of external factors on the behavior of the object under study. *Conclusions.* The proposed approach to mathematical modeling ensures high accuracy and reliability of the results, which can be useful in the development and improvement of technical systems.

**Keywords:** mathematical model, finite element method, high-speed interaction

**For citation:** Godunov A.I., Suzdaltsev P.S., Kuzin N.A. A model of high-speed interaction in the «striking element – barrier» system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):26–33. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-3

### Введение

Модель основана на методе конечных элементов с использованием эволюционирующего во времени алгоритма адаптивного сгущения сетки и учитывает различные механизмы разрушения материала преграды, такие как хрупкое разрушение, пластическое течение и сдвиговую локализацию.

Исследование демонстрирует точность и эффективность модели и показывает ее способность предсказывать механизмы разрушения преграды и кинематические поля деформаций и напряжений. Модель имеет важное значение для разработки и оптимизации высокоскоростных средств поражения и конструкций преград.

### Модель высокоскоростного взаимодействия

Для описания процесса соударения барражирующего боеприпаса (ББ) с объектом поражения, как правило, используются модели сжимаемого упругопластического тела. Основные соотношения, описывающие движение сжимаемой упругопластической среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии, замыкаются соотношениями Прандтля – Рейсса при условии текучести Мизеса [1]. Условия разрушения зависят от температуры, скорости нагружения, прочностных свойств материалов. Рассмотрим основные уравнения, описывающие процесс соударения (рис. 1) [2].

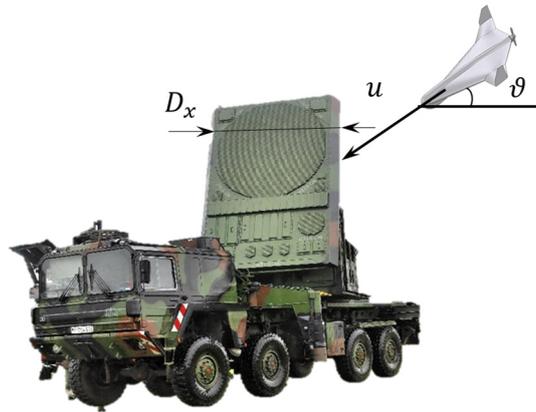


Рис. 1. Схема динамического взаимодействия ББ с объектом поражения

Законы сохранения импульса, массы и энергии представим в виде [3]:

$$\frac{du_a}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{a\beta}}{\partial x_\beta} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} + p \frac{du_a}{dx_a} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{a\beta} \dot{\epsilon}_{a\beta}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность;  $u_a$  – компоненты скорости деформации;  $\sigma_{a\beta}$  – компоненты тензора напряжений;  $\dot{\epsilon}_{a\beta}$  – компоненты тензора скоростей деформации;  $E$  – внутренняя энергия;  $x_a$  и  $x_\beta$  – составляющие вектора координат;  $\alpha, \beta, \gamma$  – индексы координатного вектора, указание индексов  $\alpha, \beta, \gamma$  означает, что берется его соответствующая координата,  $\alpha, \beta, \gamma \in \{x, y, z\}$ ;  $\frac{d}{dt}$  – субстанциональная производная по времени [4].

Здесь для сокращения записи используется форма с немymi индексами, которая означает, что если в произведении встречаются величины с одинаковыми индексами, то по ним ведется суммирование. Например, из уравнения (2) имеем

$$\frac{du_a}{dx_a} = \frac{du_x}{dx_x} + \frac{du_y}{dx_y} + \frac{du_z}{dx_z} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

для случая трехмерного пространства, а из уравнения (3) следует

$$\sigma_{a\beta} \dot{\epsilon}_{a\beta} = \sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + \sigma_{xz} \dot{\epsilon}_{xz} + \sigma_{yx} \dot{\epsilon}_{yx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + \sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx} + \sigma_{zy} \dot{\epsilon}_{zy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz}.$$

Реологические соотношения запишем в гиперупругой форме в следующем виде [5]:

$$\frac{dS_{\alpha\beta}}{dt} = 2G_0 \left( \dot{\epsilon}_{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} \dot{\epsilon}_{\alpha\beta} \right) + S_{\alpha\gamma} R_{\beta\gamma} + S_{\gamma\beta} R_{\alpha\gamma}, \quad (4)$$

где  $S_{\alpha\beta}$  – девиатор тензора напряжений для координатных составляющих  $\alpha$  и  $\beta$ , определяющий напряжения в точке, не связанные с гидростатическим напряжением (всесторонним давлением);

$G_0$  – модуль сдвига;  $R_{\alpha\gamma} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_\alpha}{\partial y} - \frac{\partial u_\gamma}{\partial \alpha} \right)$ ;  $\delta_{\alpha\beta}$  – символ Кронекера,  $\delta_{\alpha\beta} = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha = \beta, \\ 0, & \text{если } \alpha \neq \beta. \end{cases}$

Для описания пластических течений используется теория Прандтля – Рейсса. В этой теории для определения начала пластического течения используется критерий Мизеса [1]. При  $q_{\text{II}} = S_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta} = 2K^2$  ( $K$  – предел текучести на сдвиг) считается, что имеет место пластическое течение. При  $2q_{\text{II}} < 2K^2$  движение среды считается упругим. Для учета эффекта пластичности в правую часть уравнения (3) необходимо добавить член  $\theta(q_{\text{II}})(S_{\alpha\beta} \dot{\epsilon}_{\alpha\beta}) S_{\alpha\beta}$ , где

$$\theta(q_{\text{II}}) = \begin{cases} 0, & \text{если } q_{\text{II}} < 2K^2, \\ 0, & \text{если } q_{\text{II}} = 2K^2, S_{\alpha\beta} \dot{\epsilon}_{\alpha\beta} \leq 0, \\ \frac{G_0}{K^2}, & \text{если } q_{\text{II}} = 2K^2, S_{\alpha\beta} \dot{\epsilon}_{\alpha\beta} > 0. \end{cases} \quad (5)$$

В этом случае выражение  $S_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta}$  не выходит за границы поверхности Мизеса. В качестве уравнения состояния моделируемой среды использовано уравнение состояния [2]:

$$p = p_{\text{н}} + \Gamma p (E - E_{\text{н}}); \quad (6)$$

$$p_{\text{н}} = \frac{p_0 c_0 \mu (1 + \mu)}{[1 - (-1)\mu]^2}; \quad (7)$$

$$E_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{2p_0} \left( \frac{\mu}{1 + \mu} \right); \quad (8)$$

$$p\Gamma = p_0 \Gamma_0 = \text{const}; \quad (9)$$

$$\mu = \frac{p}{p_0} - 1, \quad (10)$$

где  $p$  – полное давление системы;  $p_{\text{н}}$  – давление в начальном состоянии;  $\Gamma$  – коэффициент Грюнайзена в текущий момент времени;  $\Gamma_0$  – коэффициент Грюнайзена при нормальных условиях, который характеризует термическое давление со стороны колеблющихся атомов;  $E_{\text{н}}$  – внутренняя энергия в начальном состоянии;  $p_0$  – плотность материала при нормальных условиях;  $c_0$  – скорость звука в материале;  $\mu$  – изменение плотности в процессе исследования;  $\chi$  – параметр, отражающий свойства материала. Константы  $\Gamma_0$ ,  $c_0$ ,  $\chi$  определяются экспериментальным путем [5].

Достаточно интенсивное ударное нагружение преград часто приводит к возникновению нарушений сплошности материала в результате разрушения. Например, при ударе пластиной происходит откол (рис. 2,а), под которым понимают образование макроскопической полости внутри материала преграды, которая может быть замкнутой либо выходить на поверхность преграды, а в некоторых случаях возможно отделение тыльной части преграды (рис. 2,б) [6].

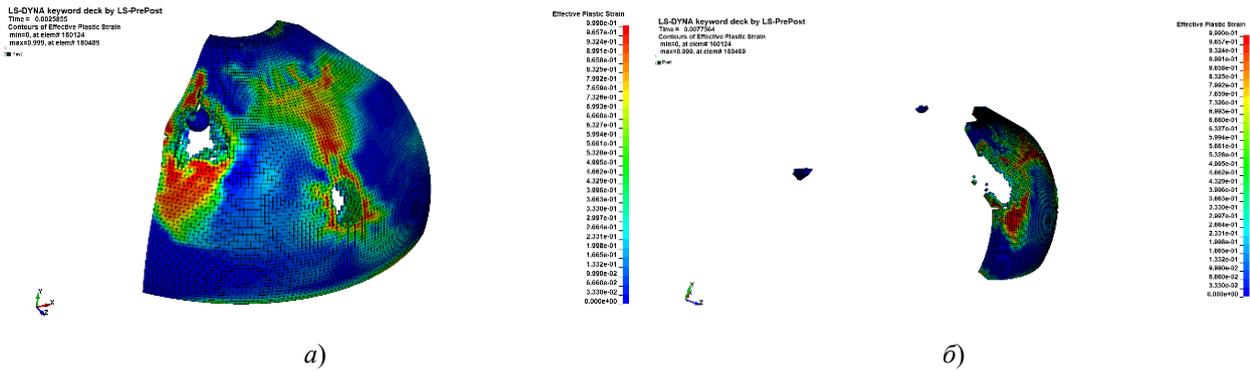


Рис. 2. Схема динамического взаимодействия ББ с объектом поражения

Численное моделирование процессов разрушения можно осуществлять несколькими путями. В континуальном подходе определяется область поврежденной среды и корректируется напряженно-деформированное состояние материала в этой области. В качестве критерия разрушения могут быть выбраны различные модели. В настоящей работе используется модель Джонсона – Кука, согласно которой предел текучести определяется формулой (5).

Рассмотрим метод сглаженных частиц, он является бессточным лагранжевым численным методом для расчетов процессов высокоскоростного соударения, а также иного интенсивного динамического нагружения тел, в особенности, когда имеет место существенное изменение топологии моделируемых объектов (разлет вещества). Производные вычисляются с помощью сплайн-интерполяции, в соответствии с чем каждая гладкая частица является точкой интерполяции, в которой известны параметры деформируемой среды. Численное решение во всей области интегрирования получается с помощью интерполяционных функций, для которых эти частицы являются интерполяционными узлами. Таким образом, вычисление градиентов сводится к аналитическому дифференцированию гладких функций [8].

Основная суть метода заключается в приближении формулы следующей цепочкой преобразований:

$$a(x) = \int_R^I a(\tilde{x}) \delta(\tilde{x} - x) d\tilde{x}, \quad (11)$$

где  $a(x)$  – некоторое свойства материала, на месте данной величины может быть плотность, скорость, положение в пространстве;  $\tilde{x}$  – конкретное значение координаты;  $\delta(\tilde{x} - x) \sim$  – дельта-функция (функция Дирака):

$$\delta(\tilde{x} - x) = \begin{cases} +\infty, & x = \tilde{x}, \\ 0, & x \neq \tilde{x}; \end{cases}$$

$R$  – некоторая область, где представляет интерес определение величины  $a(x)$ . Сначала обобщенная функция  $\delta(x)$  заменяется аналитической функцией  $\omega(\tilde{x} - x, h)$ , которую называют ядром сглаживания, а  $h$  – радиусом сглаживания. В результате получаем

$$a^*(x) = \int_R^I a(\tilde{x}) \omega(\tilde{x} - x, h) d\tilde{x}. \quad (12)$$

В случае если рассматривается среда плотности  $\rho(x)$ , то удобна бывает запись с использованием нормировки. Ядро  $\omega(\tilde{x} - x, h)$  должно удовлетворять условиям

$$\int_R^I \omega(x, h) d\tilde{x} = 1; \quad (13)$$

$$\omega(x, h) \xrightarrow{h \rightarrow 0} \delta(x). \quad (14)$$

В работе Моногана установлено, что при соблюдении этих условий и выборе  $\omega(x, h) = e^{-\left(\frac{x}{h}\right)^2}$  аппроксимация обеспечивает порядок  $O(h^2)$ .

Далее требуется рассмотреть численные методы вычисления этих интегралов. Будем полагать, что среда разбита на маленькие, по сравнению с характерными размерами рассчитываемой модели, элементы. Каждый такой элемент имеет свое значение аппроксимируемого параметра  $a(x)$  равное  $a^i$ . Также будем считать известными его плотность –  $p^i$ , место положения –  $x^i$  и массу –  $m^i$ . Здесь и далее, если не оговорено другое, верхний индекс у параметра будет обозначать его принадлежность конкретному дискретному элементу. Вопрос расположения этих элементов (далее частиц), так, чтобы наиболее лучше аппроксимировать параметр  $a(x)$ , пока является открытым. Будем использовать самое простое и очевидное начальное расположение – кубическую равномерную решетку [9].

Заменой интегрирования суммированием по частицам-соседям получаем выражение

$$a^*(x) = \sum_i \frac{m^i a^i}{p^i} \omega(x^i - x, h). \quad (15)$$

Использование такой аппроксимации существенно упрощает вычисление градиента функции  $\frac{\partial a(x)}{\partial x_a}$ , так как достаточно аналитически продифференцировать ядро сглаживания, что даст

$$\frac{\partial a^*}{\partial x_a} = \sum_i \frac{m^i a^i}{p^i} \frac{\partial \omega(x^i - x, h)}{\partial x_a}. \quad (16)$$

Рассмотрим более подробно ядро сглаживания. Важно, чтобы носитель функции  $\omega(x, h)$  был конечным, так как в сплошной среде все взаимодействия короткодействующие. Однако  $e^{-\left(\frac{x}{h}\right)^2}$  этим свойством не обладает. Из-за вышеперечисленных причин удобно использовать следующий сплайн:

$$\omega(x, h) = \begin{cases} \frac{1 - 1,75\varphi^2 + 0,75\varphi^3}{\pi h^3}, \varphi \in [0, 1]; \\ \frac{(2 - \varphi)^3}{4\pi h^3}, \varphi \in [1, 2]; \\ 0, \varphi \in [2, \infty], \end{cases} \quad (17)$$

где  $\varphi = \frac{|x - \tilde{x}|}{h}$ .

Численные аппроксимации уравнений механики деформируемого тела построены с помощью метода конечных элементов, пример такого объемного восьмиузлового элемента представлен на рис. 3, а описан следующим образом:

$$f_1^i = -\sum_k m^k (\dot{u}_a^k - \dot{u}_a^i) \frac{\partial \omega^{ik}}{\partial x_a^i}, \quad (18)$$

$$f_{2,a}^i = \sum_k m^k \left( \frac{\sigma_{a\beta}^i}{(p^i)^2} + \frac{\sigma_{a\beta}^k}{(p^k)^2} \right) \frac{\partial \omega^{ik}}{\partial x_\beta^i}; \quad (19)$$

$$f_3^i = \sum_k m^k (\dot{u}_a^i - \dot{u}_a^k) \left( \frac{\sigma_{a\beta}^i}{(p^i)^2} + \frac{\sigma_{a\beta}^k}{(p^k)^2} \right) \frac{\partial \omega^{ik}}{\partial x_\beta^i}; \quad (20)$$

$$f_{4,a\beta}^i = 2G_0 \left( \dot{\epsilon}_{a\beta}^i - \frac{1}{3} \delta_{a\beta} \dot{\epsilon}_{a\beta}^i \right) + S_{a\gamma}^i R_{\beta\gamma}^i + S_{\gamma\beta}^i R_{a\gamma}^i; \quad (21)$$

$$\dot{\epsilon}_{a\beta}^i = \frac{1}{2} \sum_k \frac{m^k}{p^k} \left[ (\dot{u}_a^i - \dot{u}_a^k) \frac{\partial \omega^{ik}}{\partial x_\beta^i} + (\dot{u}_\beta^k - \dot{u}_\beta^i) \frac{\partial \omega^{ik}}{\partial x_a^i} \right]; \quad (22)$$

$$R_{a\beta}^i = \frac{1}{2} \sum_k \frac{m^k}{p^k} \left[ (\dot{u}_a^k - \dot{u}_a^i) \frac{\partial \omega^{ik}}{\partial x_\beta^i} - (\dot{u}_\beta^k - \dot{u}_\beta^i) \frac{\partial \omega^{ik}}{\partial x_a^i} \right]. \quad (23)$$

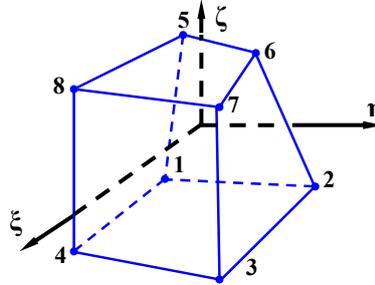


Рис. 3. Объемный восьмиузловой элемент в параметрических координатах

Производные типа  $\frac{\partial \omega_{ik}}{\partial x_\beta^i}$  и  $\frac{\partial \omega^{ik}}{\partial x_\beta^i}$  берутся от аналитической весовой функции, поэтому справа от знака равенства в уравнениях (18)–(23) стоят алгебраические выражения. Интегрирование уравнений для  $i$ -й частицы производится, как правило, по явной схеме Эйлера:

$$\begin{cases} \vec{x}^{i,n+1} = \vec{x}^{i,n} + \Delta t \left( \vec{u}^{i,n} + \frac{1}{2} \Delta t \vec{f}_2^{i,n} \right); \\ E^{i,n+1} = E^{i,n+1} + \Delta t \vec{f}_3^{i,n}; \\ p^{i,n+1} = p^{i,n+1} + \Delta t f_1^{i,n}; \\ \vec{u}^{i,n+1} = \vec{u}^{i,n+1} + \Delta t \vec{f}_2^{i,n}; \\ \hat{S}^{i,n+1} = \hat{S}^{i,n} + \Delta t \vec{f}_4^{i,n}; \\ \hat{\sigma}^{i,n+1} = -\hat{\delta} p(p^{i,n+1}, E^{i,n+1}) + \hat{S}^{i,n+1}, \end{cases} \quad (24)$$

где  $\hat{S}$ ,  $\hat{\delta}$ ,  $\hat{\sigma}$ , – тензорные величины;  $\vec{u} = (\dot{u}_x, \dot{u}_y, \dot{u}_z)$  – вектор скорости деформации;  $\Delta t$  – шаг по времени; значение  $p$  вычисляется по формуле (7); индексы  $n$  и  $n+1$  указывают на предыдущий и текущий временные слои.

Видно, что значение компонента тензора напряжений  $\hat{\sigma}^{i,n+1}$  вычисляется с помощью уравнения состояния по вычисленным значениям плотности  $p^{i,n+1}$  и дивергента  $S^{i,n+1}$ .

Шаг интегрирования выбирается следующим образом:

$$\Delta t = \min_i \frac{ah^i}{\sqrt{\max(c^i, u^i)^2 + \left( \frac{h^i p^i}{p^i} \right)^2}}, a = 0, 1 \div 0, 4, \quad (25)$$

где  $u^i$  – скорость  $i$ -й частицы;  $c^i$  – скорость звука в  $i$ -й частице;  $h^i$  – радиус сглаживания  $i$ -й частицы;  $p^i$  – плотность  $i$ -й частицы;  $p^i = f_1^i$  – производная по времени  $i$ -й частицы;  $\alpha$  зависит от используемого метода.

Так как в задачах возможно возникновение сверхзвуковых течений, то в знаменателе содержится максимум скорости частицы и продольной скорости звука в этой частице. При наличии

сверхзвуковых течений возможно сильное увеличение плотности и в этом случае существенную роль

играет член  $\left(\frac{h^i p^i}{p^i}\right)^2$  [10].

### Заключение

Разработана новая модель высокоскоростного взаимодействия в системе «поражающий элемент – преграда», основанная на методе конечных элементов с использованием эволюционирующего во времени алгоритма адаптивной сетки. Модель учитывает различные механизмы разрушения материала преграды, включая хрупкое разрушение, пластическое течение и сдвиговую локализацию. Исследование демонстрирует точность и эффективность модели, ее способность предсказывать механизмы разрушения преграды и кинематические поля деформаций и напряжений. Модель может быть использована для анализа различных сценариев высокоскоростного взаимодействия и оптимизации конструкций средств поражения и преград. Разработанная модель имеет важное значение для понимания механизмов разрушения при высокоскоростном взаимодействии. Она предоставляет исследователям и инженерам мощный инструмент для анализа и оптимизации конструкций средств поражения и преград. Модель может способствовать разработке более эффективных средств защиты от высокоскоростных поражающих элементов.

### Список литературы

1. LS-DYNA Theory Mnuual. Livermore : LSTC, 2019. 686 p.
2. Бабкин А. В., Селиванов В. В. Механика разрушения деформируемого тела. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 424 с.
3. Cai, S., Feng J., Xu H. [et al.]. The concentration of deformation caused by the closed end contributes to the destruction of the sleeve in the lower part[J] // Defence Technology. 2020. Vol. 16, № 6. P. 1151–1159.
4. Басов К. А. ANSYS справочник пользователя. М. : Изд-во ДМК-Пресс, 2005. 640 с.
5. Бабкин А. В., Колпаков В. Н., Охитин В. Н. [и др.]. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 518 с.
6. Велданов В. А. Прикладная теория удара. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 44 с.
7. Галлагер Р. М., Метод конечных элементов. Основы : пер. с англ. М. : Мир, 1984. 428 с.
8. Герасимов А. В. Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент. Томск : НТЛ, 2016. 568 с.
9. Зарубин В. С., Селиванов В. В. Вариационные и численные методы механики сплошной среды. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1993. 508 с.
10. Зенкевич О. В., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. М. : Мир, 1974. 239 с.

### References

1. *LS-DYNA Theory Mnuual*. Livermore: LSTC, 2019:686.
2. Babkin A.V., Selivanov V.V. *Mekhanika razrusheniya deformiruemogo tela = Mechanics of destruction of a deformable body*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2005:424. (In Russ.)
3. Cai S., Feng J., Xu H. et al. The concentration of deformation caused by the closed end contributes to the destruction of the sleeve in the lower part[J]. *Defence Technology*. 2020;16(6):1151–1159.
4. Basov K.A. *ANSYS spravochnik pol'zovatelya = ANSYS user's guide*. Moscow: Izd-vo DMK-Press, 2005:640. (In Russ.)
5. Babkin A.V., Kolkpakov V.N., Okhitin V.N. et al. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekayushchikh protsessov = Numerical methods in problems of physics of fast-flowing processes*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2005:518. (In Russ.)
6. Veldanov V.A. *Prikladnaya teoriya udara = Applied theory of impact*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2016:44. (In Russ.)
7. Gallager R.M. *Metod konechnykh elementov. Osnovy: per. s angl. = The finite element method. Fundamentals : translated from English*. Moscow: Mir, 1984:428. (In Russ.)
8. Gerasimov A.V. *Vysokoskorostnoy udar. Modelirovanie i eksperiment = High-speed impact. Modeling and experiment*. Tomsk: NTL, 2016:568. (In Russ.)
9. Zarubin V.S., Selivanov V.V. *Variatsionnye i chislennyye metody mekhaniki sploshnoy sredy = Variational and numerical methods of continuum mechanics*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 1993:508. (In Russ.)

10. Zenkevich O.V., Chang I. *Metod konechnykh elementov v teorii sooruzheniy i v mekhanike sploshnykh sred = The finite element method in the theory of structures and in continuum mechanics*. Moscow: Mir, 1974:239. (In Russ.)

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

**Анатолий Иванович Годунов**

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

**Павел Сергеевич Суздальцев**

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

**Николай Андреевич Кузин**

студент,  
Московский автомобильно-дорожный институт  
(технический университет)  
(Россия, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64)  
E-mail: sputnik1985nk3y@mail.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)

**Pavel S. Suzdaltsev**

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

**Nikolai A. Kuzin**

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 05.05.2025**

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ МУЛЬТИРОТОРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**В. В. Ильиных<sup>1</sup>, С. В. Андреев<sup>2</sup>, А. В. Ключников<sup>3</sup>, М. С. Чертков<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт  
технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> kb2@vniitf.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Беспилотные летательные аппараты (БЛА) активно используются в деятельности человека. При разработке новых БЛА необходимо решить как конструктивные, обликосые задачи, так и программно-алгоритмические, например, разработать алгоритмы управления и навигации. *Материалы и методы.* При разработке БЛА широко применяется математическое моделирование. Математическое моделирование позволяет исследовать функционирование БЛА как в предусмотренных режимах, так и в аварийных ситуациях, при этом создание физических образцов БЛА не требуется. *Результаты и выводы.* Предложена математическая модель мультироторного БЛА на примере квадрокоптера, изложены основные аспекты аэродинамики мультироторных БЛА, рассмотрены уравнения движения центра масс и уравнения движения вокруг центра масс квадрокоптера.

**Ключевые слова:** мультироторный беспилотный летательный аппарат, квадрокоптер, математическое моделирование

**Для цитирования:** Ильиных В. В., Андреев С. В., Ключников А. В., Чертков М. С. Математическая модель движения мультироторного беспилотного летательного аппарата // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 34–46. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-4

## MATHEMATICAL MODEL OF MOTION OF A MULTIROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

**V.V. Ilyinykh<sup>1</sup>, S.V. Andreev<sup>2</sup>, A.V. Klyuchnikov<sup>3</sup>, M.S. Chertkov<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute  
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> kb2@vniitf.ru

**Abstract.** *Background.* Unmanned aerial vehicles (UAV) are widely used in present-day reality. When developing UAV new models, solution of both design-and- appearance and program-algorithm problems such as, for example, control and navigation algorithms has to be found. *Materials and methods.* In development of the UAV a mathematical simulation is commonly used. Mathematical simulation enables studying of the UAV's operability both in routine mode and in emergency without producing UAV physical model. *Results and conclusions.* The article proposes a mathematical model of multirotor UAV using a quadcopter as an example, basic aspects of the multirotor UAV aerodynamics are set forth, equations of centroidal motion and motion around mass-center of a quadcopter are handled.

**Keywords:** multirotor unmanned aerial vehicle, quadcopter, mathematical simulation

**For citation:** Ilyinykh V.V., Andreev S.V., Klyuchnikov A.V., Chertkov M.S. Mathematical model of motion of a multirotor unmanned aerial vehicle. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):34–46. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-4

### Введение

К мультироторным относятся, как правило, беспилотные летательные аппараты (БЛА) вертолетной схемы, имеющие более трех несущих или толкающих винтов [1]. В настоящее время наибольшее распространение получили мультироторные БЛА, имеющие четыре несущих винта (НВ), т.е. квадрокоптеры. Такие характеристики, как легкость, малый размер, маневренность, простота управления, возможность модернизации и использования дополнительного оборудования, позволяют успешно использовать мультироторные БЛА для решения различных задач.

Квадрокоптеры в соответствии с рис. 1 могут иметь различные конструктивные конфигурации рамы: плюс «+», Н, правильный X, модифицированный X, мертвая (дохлая) кошка X [2].

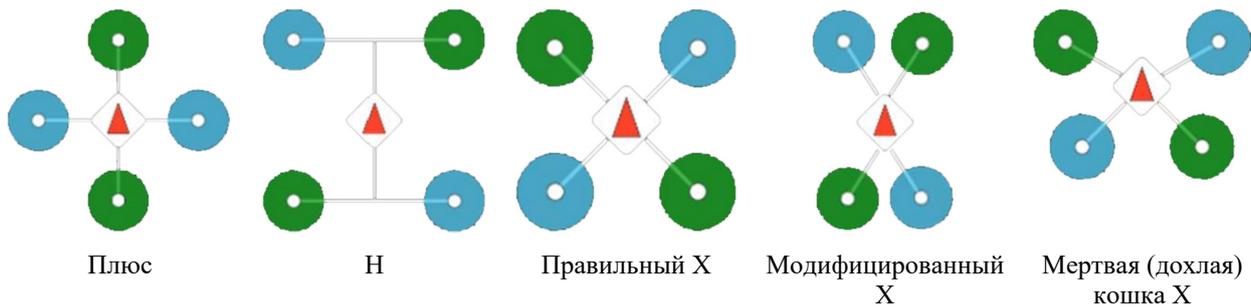


Рис. 1. Примеры схем компоновки квадрокоптеров (стрелкой на рамках БЛА указано направление оси  $OX$  связанной системы координат)

Формирование облика БЛА – отдельная научная задача [3]. Оптимальная конструкция рамы должна быть геометрически симметрична. Если рама симметрична, с точки зрения энергозатратности и устойчивости для БЛА не будет разницы маневрировать по тангажу или крену. В определенных случаях модификации рамы БЛА могут привести к положительному изменению режимов полета БЛА. Например, квадрокоптер с удлиненной рамой по оси  $X$  может быть более стабильным при маневрировании с тангажом (по сравнению с БЛА с симметричной рамой). Это может быть полезно, когда рама БЛА разработана для полета на высоких скоростях с агрессивным углом тангажа.

Другая причина для использования несимметричной рамы может заключаться в необходимости подвески к БЛА особой полезной нагрузки. Например, схема «дохлая кошка X» может использоваться, чтобы вынести НВ из поля видимости фронтальной камеры. В любом случае полезная нагрузка на раме не должна нарушать центровку, чтобы нагрузка на электродвигатели при зависании была равномерная. Кроме того, равномерное распределение веса по раме необходимо, чтобы сохранить размещение полетного контроллера в центре масс, относительно которого вращается БЛА.

Силовая установка квадрокоптера состоит из: аккумуляторной батареи, ESC-контроллеров, управляющих оборотами двигателей, бесщеточных электродвигателей и воздушных НВ. Полетный контроллер посредством широтно-импульсной модуляции выдает команды ESC-контроллеру, управляющему оборотами двигателя, на увеличение или уменьшение скорости вращения вала, что приводит к изменению тяги двигателя, в результате чего БЛА маневрирует.

В данной работе рассматривается квадрокоптер, выполненный по схеме «+».

### Системы координат

При рассмотрении задач ориентации и навигации объекта используются следующие правые системы координат (трехгранники)<sup>1</sup> [4]:

$ONHE$ , ( $g$ ) – нормальная географическая система координат (НГСК), начало  $O$  которой совпадает с одной из точек объекта (точкой местоположения чувствительных масс БЧЭ). Ось  $H$  направлена по географической вертикали вверх, ось  $N$  – вдоль касательной к меридиану  $h$ -эллипсоида на север, ось  $E$  – вдоль касательной к параллели на восток;

$OXYZ$ , ( $b$ ) – связанная с объектом система координат (СвСК). Ось  $X$  направлена по продольной оси объекта, ось  $Y$  – по нормальной, а ось  $Z$  – по поперечной;

$Ox_a Y_a Z_a$ , ( $a$ ) – скоростная система координат (СкСК). Ось  $X$  совпадает с вектором воздушной скорости объекта, ось  $Y$  – расположена в плоскости симметрии и направлена к верхней части БЛА, а ось  $Z$  – дополняет систему координат до правой.

Переход из одной системы координат в другую осуществляется с помощью матриц перехода. Так, для перехода от СвСК к НГСК используется матрица перехода  $C$ , для перехода от СвСК к СкСК – матрица  $C_a$  (рис. 2):

<sup>1</sup> Государственный стандарт Союза ССР ГОСТ 20058–80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере.

$$C = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & \sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \vartheta & \cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \gamma \cos \vartheta & -\sin \gamma \cos \vartheta \\ -\sin \psi \cos \vartheta & \sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \sin \vartheta & \cos \gamma \cos \psi - \sin \gamma \sin \psi \sin \vartheta \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$C_a = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\Psi$  – угол рысканья, рад;  $\vartheta$  – угол тангажа, рад;  $\gamma$  – угол крена, рад;  $\alpha$  – угол атаки;  $\beta$  – угол скольжения, рад.

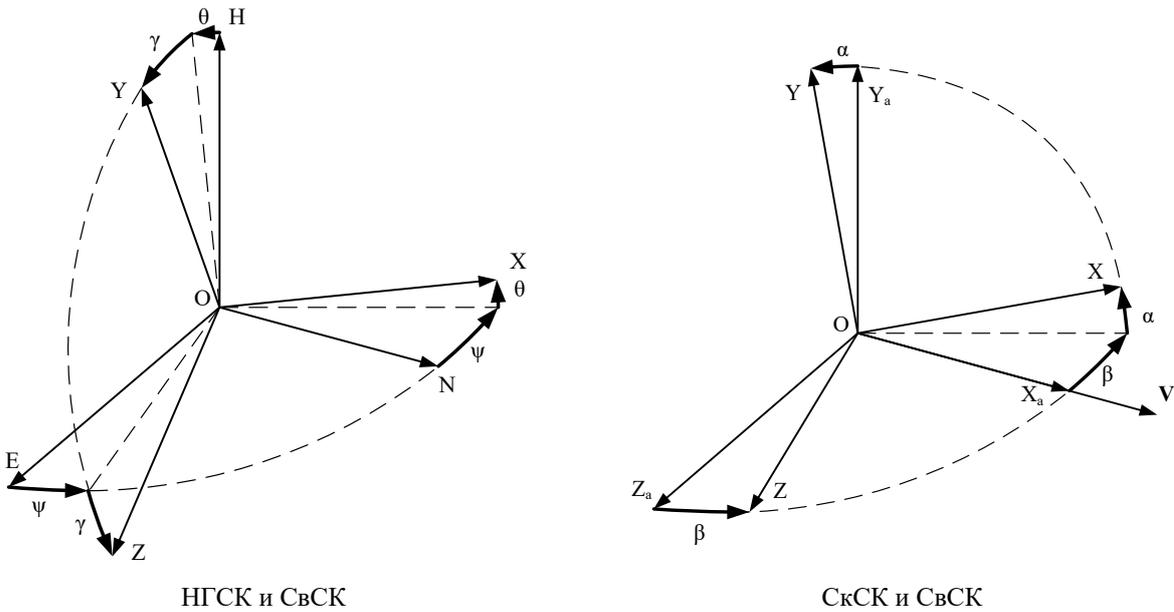


Рис. 2. Системы координат

Матрица перехода является ортогональной, обращение матрицы перехода эквивалентно транспонированию (для обратного перехода необходимо воспользоваться транспонированной матрицей  $C^T = C^{-1}$ ).

### Силы и моменты, действующие на БЛА в полете

На квадрокоптер в полете в соответствии с рис. 3 действуют [5]:

– результирующая аэродинамическая сила несущих винтов  $R_{vi}$ . Приложена в центре втулок НВ и направлена по оси валов винтов. Для инженерных расчетов принимают, что аэродинамическая сила НВ  $R_v$  по величине равна силе тяги НВ  $P_v$  (на рис. 3 показана сила тяги НВ  $P_{vi}$ );

– результирующая аэродинамическая сила рамы и подвесного оборудования. Так как БЛА не оснащен плоскостями (крылом, оперением), то предполагается, что подъемная и боковая силы его рамы равны нулю. В этом случае основной аэродинамической силой рамы, возникающей при поступательном движении БЛА, является сила сопротивления воздуха  $X_{вр}$ , приложенная в центре давления рамы. Для инженерных расчетов принимают, что линия действия силы  $X_{вр}$  проходит через центр масс. Сила  $X_{вр}$  направлена противоположно вектору воздушной скорости  $V$ ;

– сила тяжести  $G$ , приложенная в центре масс БЛА и направленная по местной вертикали вниз.

– моменты аэродинамических сил и силы тяжести, равные произведению величины силы на расстояние («плечо») от центра масс до линии действия силы;

– реактивные моменты несущих винтов  $M_{pi}$ , действующие на раму БЛА и направленные в сторону, противоположную вращению НВ.

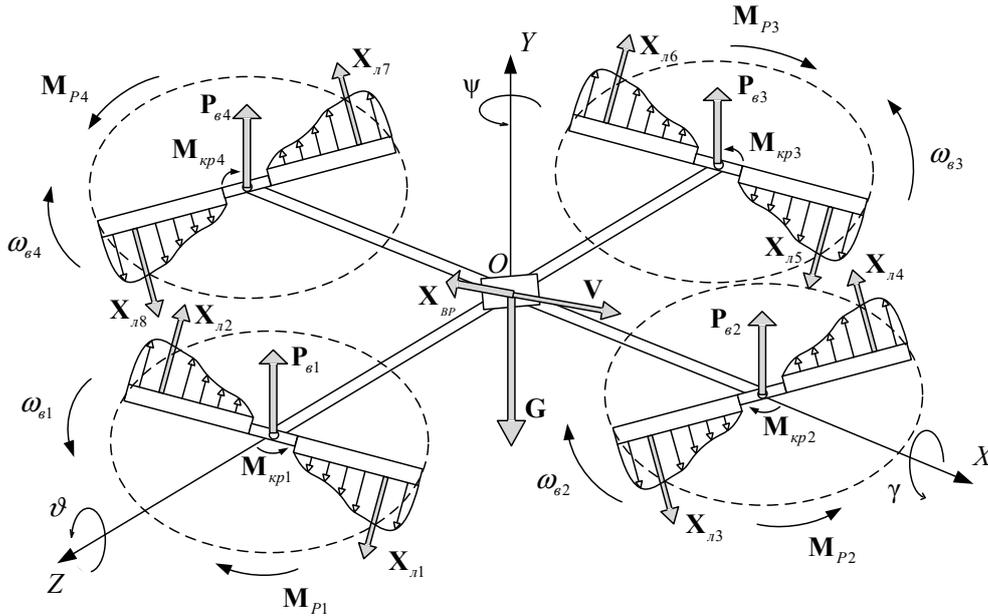


Рис. 3. Силы и моменты, действующие на квадрокоптер

Электродвигатель создает крутящий момент ( $M_{кр1}$ ,  $M_{кр2}$ ,  $M_{кр3}$ ,  $M_{кр4}$ ), приводящий в движение НВ. При вращении НВ отбрасывает воздух, проходящий через него, возникает сила тяги ( $P_{в1}$ ,  $P_{в2}$ ,  $P_{в3}$ ,  $P_{в4}$ ). Вращающийся НВ испытывает сопротивление воздуха. Сила сопротивления воздуха ( $X_{л1}$ ,  $X_{л2}$ ,  $X_{л3}$ ,  $X_{л4}$ ) создает момент сопротивления (реактивный момент  $M_{р1}$ ,  $M_{р2}$ ,  $M_{р3}$ ,  $M_{р4}$ ) в направлении, противоположном вращению НВ. Для того, чтобы квадрокоптер не вращался под действием реактивных моментов, эти моменты уравниваются за счет противовращения: для этого у квадрокоптера в соответствии с рис. 3 НВ 2 и 4 вращаются по часовой стрелке, а НВ 1 и 3 – против часовой стрелки. В итоге реактивные моменты НВ, вращающихся по часовой стрелке, уравниваются моментами НВ, вращающихся против часовой стрелки [6].

### Аэродинамическая сила НВ

Тяга НВ получается за счет того, что его лопасти отбрасывают воздух, при этом элементы лопасти рассекают воздух с различными скоростями, пропорциональными их расстоянию от оси вращения. Сила реакции воздуха, отбрасываемого вдоль оси винта, и является его тягой. На место отброшенного воздуха поступает новый, поэтому перед НВ образуется движение воздуха навстречу винту – подсосывание, а позади – отбрасывание от винта. Воздух подсосывается к винту со всех сторон, ускоряя свое движение по мере приближения к ометаемой лопастями поверхности. Винт придает воздуху дополнительную (индуктивную) скорость – отбрасывает его вниз и закручивает струю.

Картина осевого обтекания НВ (для движения БЛА в вертикальной плоскости (висение, подъем, снижение) при отсутствии ветра) является осесимметричной. Поэтому равнодействующая всех аэродинамических сил, возникающих на лопастях, т.е. равнодействующая аэродинамическая сила НВ  $R_B$ , направлена по оси НВ и является его тягой  $P_B$ . При косом обтекании (вектор воздушной скорости не перпендикулярен плоскости вращения НВ) картина обтекания уже не является осесимметричной. При наличии скорости БЛА возникает продольная сила несущего винта  $H_B$  (аналогичная силе сопротивления). Кроме того, вследствие бокового отклонения струи воздуха, возникающего при закручивании, появляется и боковая сила  $S_{НВ}$ . Таким образом, в общем случае результирующая аэродинамическая сила НВ отклоняется назад и вбок от оси вала винта. Угол отклонения невелик – всего несколько градусов, поэтому для инженерных расчетов принимают, что аэродинамическая сила НВ  $R_B$  по величине практически равна тяге НВ  $P_B$

$$\mathbf{R}_B = \begin{bmatrix} H_B \\ P_B \\ S_{НВ} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ P_B \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

### Сила тяги

Сила тяги НВ – сумма тяг всех его лопастей. Сила тяги направлена вдоль оси вала НВ.

Способность винта создавать тягу путем отбрасывания с определенной скоростью некоторой массы воздуха зависит от размера винта, скоростного напора воздуха и несущих свойств винта (его лопастей). Поэтому при расчете аэродинамических характеристик винта широко используют способ записи аэродинамических сил с помощью безразмерных коэффициентов, относя силы к характерной площади и скоростному напору, рассчитываемому исходя из скорости движения по окружности концевое сечения лопасти, а не из скорости полета БЛА. Тогда тягу НВ можно выразить как

$$P_b = C_T S_b \rho \frac{r_b^2 \omega_b^2}{2}, \quad (4)$$

где  $P_b$  – тяга винта, Н;  $C_T$  – коэффициент тяги, зависящий от линейной скорости БЛА, угловой скорости вращения винта, а также угла общего шага винта [7];  $S_b$ ,  $r_b$  – площадь и радиус окружности, которую описывает винт, соответственно, м<sup>2</sup>, м;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>, зависящая от высоты полета и устанавливаемая для стандартной атмосферы по ГОСТ 4401-81<sup>1</sup>;  $\omega_b$  – угловая скорость вращения винта, рад/с.

Вектор силы тяги квадрокоптера определяется в СвСК как

$$\mathbf{P}_b = \begin{bmatrix} 0 \\ P \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $P$  – суммарная тяга, Н, результат действия четырех двигателей квадрокоптера:

$$P = \sum_{i=1}^4 P_{bi} = \sum_{i=1}^4 c_{pi} \omega_{bi}^2, \quad (6)$$

где  $c_p$  – интегральный коэффициент силы тяги, определяемый по формуле

$$c_{pi} = \frac{1}{2} \rho C_T S_{bi} r_{bi}^2. \quad (7)$$

При этом непосредственными управляющими воздействиями являются изменение числа оборотов (угловой скорости вращения) НВ.

### Аэродинамическая сила рамы

Аэродинамическую силу, создаваемую рамой БЛА, в СвСК можно определить как

$$\mathbf{R}_{пл,а} = \begin{bmatrix} -X_{вр} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

На раму, подвес и другие находящиеся в потоке части БЛА действуют силы сопротивления воздуха вследствие обдувки этих частей индуктивной струей от НВ и потоком из-за поступательного движения БЛА. Это сопротивление является вредным, так как создается ненесущими частями БЛА и требует излишней затраты энергии.

Для каждого  $j$ -го элемента рамы и подвеса БЛА сила лобового сопротивления запишется

$$X_{врj} = C_{xj} S_j \frac{\rho V_j^2}{2}, \quad (9)$$

где  $C_{xj}$  – безразмерный коэффициент аэродинамического (лобового) сопротивления  $j$ -го элемента рамы и подвеса;  $S_j$  – характерная площадь элемента;  $V_j$  – скорость потока, обтекающего данный элемент.

<sup>1</sup> ГОСТ 4401–81. Атмосфера стандартная. Параметры.

Сила вредного лобового сопротивления БЛА

$$X_{\text{вр}} = \sum_{j=1}^{j=n} X_{\text{вр}j}, \quad (10)$$

где  $n$  – количество элементов, находящихся в потоке.

Скорости  $V_j$  обычно осредняются и считаются одинаковыми для всех элементов. С достаточной для моделирования точностью можно считать, что средняя скорость обдувки БЛА, равна [6]:

– при осевом обтекании сумме вертикальной скорости БЛА и удвоенной индуктивной скорости подсасывания воздуха;

– при косом обтекании скорости полета БЛА.

Формулу (9) можно записать в виде

$$X_{\text{вр}} = \frac{\rho V_{\text{cp}}^2}{2} \sum_{j=1}^{j=n} C_{xj} S_j, \quad (11)$$

где  $V_{\text{cp}}$  – модуль средней воздушной скорости, м/с.

### *Сила тяжести*

Вектор нормальной составляющей силы тяжести (не учитывающий гравитационные аномалии) направлен вдоль местной геодезической вертикали, т.е. вдоль нормали к земному эллипсоиду. Следовательно, в НГСК горизонтальные составляющие вектора ускорения силы тяжести  $\mathbf{g}$  будут равны нулю, а силу тяжести в проекциях на оси НГСК можно определить как

$$\mathbf{G}_g = \begin{bmatrix} 0 \\ -mg \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где  $m$  – масса БЛА, кг.

В 1971 г. на ассамблее Международного союза геофизики и геодезии в Москве была рекомендована формула нормального значения ускорения силы тяжести, получившая название системы 1967 г.:

$$g_0 = 9,780318 \cdot (1 + 0,0053024 \cdot \sin^2(\varphi) - 0,0000059 \cdot \sin^2(2\varphi)), \quad (13)$$

где  $g_0$  – ускорение силы тяжести на референц-эллипсоиде, наилучшим образом совпадающим с поверхностью геоида (на уровне моря), м/с<sup>2</sup>;  $\varphi$  – географическая широта места, рад.

Высота в формуле (13) может быть учтена в виде

$$g = g_0 - 0,000003086 \cdot h, \quad (14)$$

где  $h$  – высота над эллипсоидом, м [8].

### *Реактивный момент*

От силовой установки на вал НВ передается крутящий момент  $\mathbf{M}_{\text{кр}}$ . При этом рама квадрокоптера, на которой закреплена силовая установка, испытывает согласно третьему закону механики действие равного по величине, но противоположно направленного реактивного момента  $\mathbf{M}_p$ , стремящегося развернуть квадрокоптер в сторону, противоположную направлению вращения НВ (см. рис. 3). Этот момент  $\mathbf{M}_p$  называется реактивным, так как возникает вследствие реакции воздуха (сил сопротивления воздуха) при вращении НВ.

При постоянных оборотах НВ реактивный момент представляет собой момент от сил сопротивления воздуха вращению НВ. При изменении оборотов НВ к реактивному моменту от сил сопротивления воздуха добавляется момент от тангенциальных сил инерции, возникающих при наличии углового ускорения, и реактивный момент НВ складывается из двух частей:

$$\mathbf{M}_p = \mathbf{M}_{\text{сопр}} + \mathbf{M}_{\text{ин}}, \quad (15)$$

где  $\mathbf{M}_p$  – реактивный момент НВ, Нм;  $\mathbf{M}_{\text{сопр}}$  – момент сил сопротивления вращению, Нм;  $\mathbf{M}_{\text{ин}}$  – момент от тангенциальных сил инерции, Нм.

Обычно для инженерных расчетов принимают, что

$$\mathbf{M}_p = \mathbf{M}_{\text{сопр}} = |\mathbf{M}_{\text{кр}}|. \quad (16)$$

где  $\mathbf{M}_{\text{кр}}$  – крутящий момент силовой установки, Нм.

Реактивный момент, равный моменту сопротивления (крутящему моменту), может быть выражен с помощью аэродинамического коэффициента. В качестве плеча силы сопротивления принимается величина радиуса НВ, момент сил сопротивления выражается формулой

$$|\mathbf{M}_p| = |\mathbf{M}_{\text{сопр}}| = |\mathbf{M}_{\text{кр}}| = m_{\text{кр}} S_{\text{в}} \rho \frac{r_{\text{в}}^2 \omega_{\text{в}}^2}{2} r_{\text{в}}, \quad (17)$$

где  $m_{\text{кр}}$  – аэродинамический коэффициент момента сопротивления воздуха, или

$$|\mathbf{M}_p| = |\mathbf{M}_{\text{сопр}}| = |\mathbf{M}_{\text{кр}}| = m_p \omega_{\text{в}}^2, \quad (18)$$

где  $m_p$  – интегральный коэффициент момента сопротивления воздуха, равный

$$m_p = \frac{1}{2} m_{\text{кр}} S_{\text{в}} \rho r_{\text{в}}^3. \quad (19)$$

В случае квадрокоптера, изображенного на рис. 3, реактивный момент БЛА, создаваемый вращающимися НВ в СвСК, можно определить как

$$\mathbf{M}_p = \begin{bmatrix} 0 \\ M_{p2} + M_{p4} - M_{p1} - M_{p3} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где  $\mathbf{M}_p$  – реактивный момент БЛА, создаваемый вращающимися НВ, Нм;  $M_{p1}, M_{p2}, M_{p3}, M_{p4}$  – реактивные моменты, создаваемые вращающимися НВ и направленные в сторону противоположную от вращения соответствующего винта, Нм.

### **Момент аэродинамической силы НВ**

Момент аэродинамической силы НВ, согласно определению момента силы, равен произведению силы на плечо (расстояние от точки приложения силы до точки (оси), относительно которой момент рассчитывается).

Если рассматривать квадрокоптер, сконструированный по «+»-образной схеме, приведенной на рис. 3, то момент, создаваемый аэродинамической силой НВ, в СвСК можно определить как

$$\mathbf{M}_{R_{\text{в}}} = \begin{bmatrix} (P_{\text{в}3} - P_{\text{в}1})l \\ 0 \\ (P_{\text{в}2} - P_{\text{в}4})l \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где  $\mathbf{M}_{R_{\text{в}}}$  – момент аэродинамической силы НВ, Нм;  $l$  – расстояние от оси вращения вала двигателя до центра масс квадрокоптера, м.

### **Момент аэродинамической силы рамы**

Момент, создаваемый аэродинамической силой рамы равен нулю, так как линия действия силы проходит через центр масс и плечо силы равно нулю

$$\mathbf{M}_{R_{\text{ш}}} = 0, \quad (22)$$

где  $\mathbf{M}_{R_{\text{ш}}}$  – момент аэродинамической силы рамы и подвеса, Нм.

### *Момент гравитационной силы (силы тяжести)*

Если принять гипотезу об однородности поля тяготения, то гравитационная сила (сила тяжести) не создает момента, поскольку приложена в центре масс:

$$\mathbf{M}_G = 0, \quad (23)$$

где  $\mathbf{M}_G$  – момент сил гравитации, Нм.

### *Главный вектор внешних моментов*

Главный вектор внешних моментов в проекциях на оси СвСК  $b$  можно представить в виде

$$\mathbf{M}_b = \mathbf{M}_{R_{\text{ш}}} + \mathbf{M}_p + \mathbf{M}_{R_{\text{ш}}} + \mathbf{M}_G, \quad (24)$$

где  $\mathbf{M}_b$  – главный вектор внешних моментов в проекциях на оси СвСК, Нм.

### **Зависимость угловых скоростей НВ от управляющих воздействий**

Управление квадрокоптером осуществляется путем изменения силы тяги и моментов по углам крена, рыскания и тангажа (составляющих главного вектора внешних моментов), что реализуется изменением угловой скорости вращения НВ. Связь угловой скорости вращения НВ с силой тяги и управляющими моментами в соответствии с уравнениями (6), (20) и (21) можно определить как

$$\begin{bmatrix} P \\ M_\gamma \\ M_\psi \\ M_\vartheta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_p (\omega_{b1}^2 + \omega_{b2}^2 + \omega_{b3}^2 + \omega_{b4}^2) \\ lc_p (-\omega_{b1}^2 + \omega_{b3}^2) \\ m_p (-\omega_{b1}^2 + \omega_{b2}^2 - \omega_{b3}^2 + \omega_{b4}^2) \\ lc_p (\omega_{b2}^2 - \omega_{b4}^2) \end{bmatrix}, \quad (25)$$

или в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} P \\ M_\gamma \\ M_\psi \\ M_\vartheta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_p & c_p & c_p & c_p \\ -lc_p & 0 & lc_p & 0 \\ -m_p & m_p & -m_p & m_p \\ 0 & lc_p & 0 & -lc_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{b1}^2 \\ \omega_{b2}^2 \\ \omega_{b3}^2 \\ \omega_{b4}^2 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Пусть  $U_1, U_2, U_3, U_4$  – значения потребных силы тяги и управляющих моментов по крену, рысканию и тангажу. Из формулы (26) можно определить угловые скорости вращения НВ, необходимые для создания потребных силы тяги и управляющих моментов:

$$\begin{bmatrix} \omega_{b1}^2 \\ \omega_{b2}^2 \\ \omega_{b3}^2 \\ \omega_{b4}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4c_p} & -\frac{1}{2lc_p} & -\frac{1}{4m_p} & 0 \\ \frac{1}{4c_p} & 0 & \frac{1}{4m_p} & \frac{1}{2lc_p} \\ \frac{1}{4c_p} & \frac{1}{2lc_p} & -\frac{1}{4m_p} & 0 \\ \frac{1}{4c_p} & 0 & \frac{1}{4m_p} & -\frac{1}{2lc_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Потребные значения силы тяги и управляющих моментов могут быть сформированы алгоритмами управления, реализующими, например, ПИД-регулятор, регулятор на основе линеаризации обратной связью, адаптивный регулятор и др.

### Математическая модель квадрокоптера

Движение БЛА как твердого тела постоянной массы состоит из поступательного движения центра масс и вращательного движения относительно центра масс.

При моделировании БЛА приняты следующие допущения: БЛА – твердое тело постоянной массы; БЛА имеет симметричную компоновку; центр масс БЛА расположен в начале СвСК; оси вращения НВ параллельны друг другу, относительно рамы угловое положение осей неизменно; применяются НВ с жестким креплением лопастей; аэроупругие свойства НВ не учитываются (рассматривается «жесткий» винт, упругими деформациями конструкции НВ пренебрегаем); динамика маховых движений лопастей НВ не рассматривается; коэффициенты силы тяги и моментов, создаваемых НВ, равны; перекрестные связи представлены гироскопическими моментами, возникающими при вращении БЛА, двигателей, НВ; влияние близости поверхности земли (воздушной подушки) не учитывается; атмосфера является спокойной, ветер и турбулентность отсутствуют; распределение гравитационных сил не зависит от высоты полета и географических координат.

Уравнения движения центра масс согласно второму закону Ньютона в ИСК околоземного навигационного пространства можно записать в виде

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} + \mathbf{G}', \quad (28)$$

где  $\mathbf{a}$  – вектор абсолютного ускорения БЛА,  $\text{м/с}^2$ ;  $\mathbf{F}$  – равнодействующий или главный вектор всех негравитационных сил, Н;  $\mathbf{G}'$  – гравитационная сила тяготения Земли, Н.

Выражение (28) показывает, что ускорение возникает при действии на БЛА какой-либо неуравновешенной силы  $\mathbf{F} + \mathbf{G}' \neq 0$ . При известных массе и силе тяжести БЛА (гравитационной силе) величина и направление ускорения определяются величиной и направлением силы  $\mathbf{F}$ .

В задачах динамики управляемого движения мультироторного БЛА должны учитываться аэродинамические силы, формируемые как винтами, так и его рамой. Тогда равнодействующий вектор негравитационных сил, действующих на квадрокоптер, равен

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_{пл}. \quad (29)$$

Разделив (28) на  $m$ , получим

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} + \frac{\mathbf{G}'}{m} = \mathbf{n} + \mathbf{g}', \quad (30)$$

где  $\mathbf{n}$  – вектор кажущегося ускорения (показания акселерометров),  $\text{м/с}^2$ , т.е. ускорения, которое имела бы точка массой  $m$  под воздействием негравитационных сил, если бы могла двигаться в пространстве, свободном от действия силы тяготения.

Для позиционирования в околоземном навигационном пространстве из выражения (30) необходимо определить ускорение относительного движения, например, относительно НГСК:

$$\left( \frac{d\mathbf{v}_k}{dt} \right)_g = \frac{1}{m} (\mathbf{R}_{\theta g} + \mathbf{R}_{nrg}) + \mathbf{g}_g - (\boldsymbol{\omega}_g^a + \boldsymbol{\Omega}) \times \mathbf{v}_{kg}, \quad (31)$$

или если выразить ускорение относительно земли через кажущееся ускорение:

$$\left( \frac{d\mathbf{v}_k}{dt} \right)_g = \mathbf{n} + \mathbf{g} - (\boldsymbol{\omega}_g^a + \boldsymbol{\Omega}) \times \mathbf{v}_k, \quad (32)$$

где  $\left( \frac{d\mathbf{v}_k}{dt} \right)_g = (\dot{v}_N, \dot{v}_H, \dot{v}_E)^T$  – локальная производная земной скорости  $\mathbf{v}_k$  в системе координат  $g$ ,  $\text{м/с}^2$ ;

$\boldsymbol{\omega}_g^a$  – абсолютная угловая скорость вращения НГСК  $g$ ,  $\text{рад/с}$ ;  $\boldsymbol{\Omega}$  – вектор угловой скорости вращения Земли,  $\text{рад/с}$ ;  $\mathbf{v}_k$  – вектор земной относительной скорости,  $\text{м/с}$ .

Проекция абсолютной угловой скорости НГСК  $g$  на собственные оси:

$$\boldsymbol{\omega}_g^a = \begin{bmatrix} \Omega \cos \varphi + \frac{v_E}{R_\lambda + h} \\ \Omega \sin \varphi + \frac{v_E}{R_\lambda + h} \operatorname{tg} \varphi \\ -\frac{v_N}{R_\varphi + h} \end{bmatrix}, \quad (33)$$

где  $\Omega = 7,2921158553 \cdot 10^{-5}$  – модуль угловой скорости вращения Земли, рад/с;  $R_\lambda = \frac{R_e}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}$  –

радиус кривизны первого вертикала, м;  $R_\varphi = \frac{R_e (1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$  – радиус кривизны меридианного сече-

ния, м;  $e^2 = 2\alpha_e - \alpha_e^2$  – квадрат эксцентриситета эллипсоида;  $R_e$  – большая полуось эллипсоида, м;  $\alpha_e$  – сжатие эллипсоида.

Вращение БЛА относительно центра масс определяется уравнением, описывающим изменение главного кинетического момента твердого тела в результате действия главного вектора внешних моментов:

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{M}, \quad (34)$$

где  $\mathbf{L}$  – главный кинетический момент твердого тела (момент импульса), м<sup>2</sup>кг/с;  $\mathbf{M}$  – главный вектор внешних моментов, Нм.

При моделировании вращательного движения БЛА удобно использовать уравнения движения в проекции на СвСК, поскольку в них задаются массоинерционные и геометрические характеристики аппарата.

Для системы с относительно тяжелыми вращающимися частями (роторы двигателя и НВ) в проекциях на оси СвСК  $b$  можно получить

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}}_b^a + \mathbf{J}_{\text{вр}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\text{вр}} + \boldsymbol{\omega}_b^a \times (\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}_b^a + \mathbf{J}_{\text{вр}}\boldsymbol{\omega}_{\text{вр}}) = \mathbf{M}_b, \quad (35)$$

где  $\mathbf{J} = \text{const}$  – матрица моментов инерции БЛА, кг·м<sup>2</sup>, по главной диагонали которой расположены моменты инерции БЛА относительно СвСК  $J_x, J_y, J_z$ , а остальные элементы представляют собой центробежные моменты инерции;  $\boldsymbol{\omega}_b^a$  – абсолютная угловая скорость вращения СвСК  $b$  (показания датчиков угловой скорости), рад/с;  $\mathbf{J}_{\text{вр}} = \text{const}$  – матрица суммарного момента инерции вращающихся частей, кг·м<sup>2</sup>;  $\boldsymbol{\omega}_{\text{вр}}$  – суммарная угловая скорость вращающихся частей, рад/с.

В уравнении (36) произведение  $\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}_b^a$  называют кинетическим моментом объекта, а векторное произведение  $\boldsymbol{\omega}_b^a \times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}_b^a$  – гироскопическим моментом объекта, в данном случае БЛА или квадрокоптера; произведение  $\mathbf{J}_{\text{вр}}\boldsymbol{\omega}_{\text{вр}}$  – суммарный кинетический момент тяжелых вращающихся частей, обычно направленный вдоль оси вращения; векторное произведение  $\boldsymbol{\omega}_b^a \times \mathbf{J}_{\text{вр}}\boldsymbol{\omega}_{\text{вр}}$  определяет гироскопический момент, возникающий при вращении частей двигательной установки с большой угловой скоростью [9, 10].

Полагая  $\mathbf{J} = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$  (при совмещении осей СвСК и главных осей инерции БЛА), относительно изменения абсолютной угловой скорости вращения СвСК  $b$  уравнение (35) можно записать в виде

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_b^a = \text{diag}\left(\frac{1}{J_x}, \frac{1}{J_y}, \frac{1}{J_z}\right) \left( \mathbf{M}_b - \mathbf{J}_{\text{вр}}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\text{вр}} - \boldsymbol{\omega}_b^a \times (\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}_b^a + \mathbf{J}_{\text{вр}}\boldsymbol{\omega}_{\text{вр}}) \right). \quad (36)$$

Для определения углового положения объекта угловую скорость СвСК относительно НГСК  $\omega_b^{o.g}$  можно получить как

$$\omega_b^{o.g} = \omega_b^a - \omega_g^a. \quad (37)$$

Угловую ориентацию БЛА относительно НГСК  $g$  можно задать с помощью углов рысканья  $\Psi$ , тангажа  $\vartheta$  и крена  $\gamma$ . Связь углов рысканья  $\Psi$ , тангажа  $\vartheta$  и крена  $\gamma$  с угловыми скоростями  $\omega_b^{o.g}$  описывается кинематическими уравнениями Эйлера:

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= \omega_{xb}^{o.g} - (\omega_{yb}^{o.g} \cos \gamma - \omega_{zb}^{o.g} \sin \gamma) \operatorname{tg} \vartheta; \\ \dot{\Psi} &= (\omega_{yb}^{o.g} \cos \gamma - \omega_{zb}^{o.g} \sin \gamma) / \cos \vartheta; \\ \dot{\vartheta} &= \omega_{yb}^{o.g} \sin \gamma + \omega_{zb}^{o.g} \cos \gamma. \end{aligned} \quad (38)$$

Таким образом, полная математическая модель, описывающая пространственную и угловую динамику квадрокоптера, состоит из уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{v}_N &= \frac{1}{m} (R_{bgx} + R_{плgx}) - \left( \frac{v_E}{R_\lambda + h} \operatorname{tg} \varphi + 2\Omega \sin \varphi \right) v_E - \frac{v_N v_H}{R_\varphi + h}; \\ \dot{v}_H &= \frac{1}{m} (R_{bgv} + R_{плgv}) - g + \frac{v_N^2}{R_\varphi + h} + \left( \frac{v_E}{R_\lambda + h} + 2\Omega \cos \varphi \right) v_E; \\ \dot{v}_E &= \frac{1}{m} (R_{bgz} + R_{плgz}) + \left( \frac{v_E}{R_\lambda + h} \operatorname{tg} \varphi + 2\Omega \sin \varphi \right) v_N - \left( \frac{v_E}{R_\lambda + h} + 2\Omega \cos \varphi \right) v_H; \\ \dot{\omega}_{bx}^a &= \frac{1}{J_x} \left( (P_{B3} - P_{B1}) l + (J_y - J_z) \omega_{by}^a \omega_{bz}^a + J_{вpy} \omega_{вpy}^a \omega_{bz}^a \right); \\ \dot{\omega}_{by}^a &= \frac{1}{J_y} \left( M_{P2} + M_{P4} - M_{P1} - M_{P3} - J_{B_{вpy}} \dot{\omega}_{вpy} + (J_z - J_x) \omega_{bx}^a \omega_{bz}^a \right); \\ \dot{\omega}_{bz}^a &= \frac{1}{J_z} \left( (P_{B2} - P_{B4}) l + (J_x - J_y) \omega_{bx}^a \omega_{by}^a - J_{вpy} \omega_{вpy}^a \omega_{bx}^a \right); \\ \omega_{bx}^{o.g} &= \omega_{bx}^a - \Omega \cos \varphi - \frac{v_E}{R_\lambda + h}; \\ \omega_{by}^{o.g} &= \omega_{by}^a - \Omega \sin \varphi - \frac{v_E}{R_\lambda + h} \operatorname{tg} \varphi; \\ \omega_{bz}^{o.g} &= \omega_{bz}^a + \frac{v_N}{R_\varphi + h}; \\ \dot{\gamma} &= \omega_{xb}^{o.g} - (\omega_{yb}^{o.g} \cos \gamma - \omega_{zb}^{o.g} \sin \gamma) \operatorname{tg} \vartheta; \\ \dot{\Psi} &= (\omega_{yb}^{o.g} \cos \gamma - \omega_{zb}^{o.g} \sin \gamma) / \cos \vartheta; \\ \dot{\vartheta} &= \omega_{yb}^{o.g} \sin \gamma + \omega_{zb}^{o.g} \cos \gamma. \end{aligned} \right. \quad (39)$$

### Заключение

На примере квадрокоптера «+»-образной схемы рассмотрена математическая модель мультироторного БЛА, описаны силы и моменты, действующие на БЛА в полете, выведены зависимости необходимых угловых скоростей вращения НВ от потребных значений силы тяги и управляющих моментов, приведены выражения, описывающие модель динамики движения квадрокоптера в виде законов изменения линейного и углового ускорения относительно земной системы координат.

Полученная математическая модель может быть соответствующим образом доработана или упрощена (линеаризована) в соответствии с решаемыми задачами. Математическая модель может

быть использована в составе программного обеспечения полунатурных стендов при разработке и отладке систем стабилизации и управления летательным аппаратом типа квадрокоптер без использования реального БЛА.

### Список литературы

1. Горячев Н. В., Ергалиев Д. С., Полтавский А. В. [и др.]. Беспилотные летательные аппараты. Проблемы проектирования и эксплуатации. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 306 с.
2. Nikolakopoulos G., Mansouri S. S., Kanellakis C. *Aerial Robotic Workers. Design, Modeling, Control, Vision, and Their Applications*. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2023.
3. Нгуен Тхань Лонг, Кузин Н. А., Юрков Н. К. К проблеме формирования облика перспективных беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 55–66.
4. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 512 с.
5. Ромасевич В. Ф., Самойлов Г. А. *Аэродинамика и динамика полета вертолетов : учебник для курсантов ВВАУЛ*. М. : Воениздат, 1982. 485 с.
6. Булат П. В., Дудников С. Ю., Кузнецов П. Н. *Основы аэродинамики беспилотных воздушных судов : учеб. пособие*. М. : Спутник +, 2021. 273 с.
7. Моисеев В. С. *Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами : монография*. Казань : Республиканский центр мониторинга качества образования, 2013. 768 с.
8. Августов Л. И., Бабиченко А. В., Орехов М. И. [и др.]. *Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве*. М. : Научтехлитиздат, 2015. 592 с.
9. Ефремов А. В., Захарченко В. Ф., Овчаренко В. Н. [и др.]. *Динамика полета : учебник для студентов вузов*. М. : Машиностроение, 2011. 776 с.
10. Овчаренко В. Н. *Аэродинамические характеристики летательных аппаратов: идентификация по полетным данным*. М. : Ленанд, 2019. 236 с.

### References

1. Goryachev N.V., Ergaliev D.S., Poltavskiy A.V. et al. *Bespilotnye letatel'nye apparaty. Problemy proektirovaniya i ekspluatatsii = Unmanned aerial vehicles. Problems of design and operation*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:306. (In Russ.)
2. Nikolakopoulos G., Mansouri S.S., Kanellakis C. *Aerial Robotic Workers. Design, Modeling, Control, Vision, and Their Applications*. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2023.
3. Nguen Tkhan' Long, Kuzin N.A., Yurkov N.K. On the problem of shaping the appearance of promising unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):55–66. (In Russ.)
4. Chelnokov Yu.N. *Kvaternionnye i bikvaternionnye modeli i metody mekhaniki tverdogo tela i ikh prilozheniya. Geometriya i kinematika dvizheniya = Quaternionic and biquaternionic models and methods of solid mechanics and their applications. Geometry and kinematics of motion*. Moscow: FIZMATLIT, 2006:512. (In Russ.)
5. Romasevich V.F., Samoylov G.A. *Aerodinamika i dinamika poleta vertoletov: uchebnik dlya kursantov VVAUL = Aerodynamics and dynamics of helicopter flight : a textbook for Air Force cadets*. Moscow: Voениzdat, 1982:485. (In Russ.)
6. Bulat P.V., Dudnikov S.Yu., Kuznetsov P.N. *Osnovy aerodinamiki bespilotnykh vozdushnykh sudov: ucheb. posobie = Fundamentals of aerodynamics of unmanned aircraft : textbook*. Moscow: Sputnik +, 2021:273. (In Russ.)
7. Moiseev V.S. *Prikladnaya teoriya upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami : monografiya = Applied theory of control of unmanned aerial vehicles : monograph*. Kazan': Respublikanskiy tsentr monitoringa kachestva obrazovaniya, 2013:768. (In Russ.)
8. Avgustov L.I., Babichenko A.V., Orekhov M.I. et al. *Navigatsiya letatel'nykh apparatov v okolozemnom prostranstve = Navigation of aircraft in near-Earth space*. Moscow: Nauchtekhlitizdat, 2015:592. (In Russ.)
9. Efremov A.V., Zakharchenko V.F., Ovcharenko V.N. et al. *Dinamika poleta: uchebnik dlya studentov vuzov = Flight dynamics : a textbook for university students*. Moscow: Mashinostroenie, 2011:776. (In Russ.)
10. Ovcharenko V.N. *Aerodinamicheskie kharakteristiki letatel'nykh apparatov: identifikatsiya po poletnym dannym = Aerodynamic characteristics of aircraft: identification from flight data*. Moscow: Lenand, 2019:236. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

**Владимир Викторович Ильиных**  
инженер-конструктор,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

**Vladimir V. Ilyinykh**  
Design engineer,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

**Степан Витальевич Андреев**

начальник отдела,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

**Александр Васильевич Ключников**

кандидат технических наук, главный специалист,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

**Максим Сергеевич Чертков**

начальник группы,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

**Stepan V. Andreev**

Head of the department,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

**Aleksandr V. Klyuchnikov**

Candidate of technical sciences, chief engineer,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

**Maksim S. Chertkov**

Group leader,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 05.05.2025**

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

## DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 536.521.2

doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-5

### СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ БЕСКОНТАКТНОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Б. С. Бейсембаева<sup>1</sup>, Н. В. Горячев<sup>2</sup>, А. В. Лысенко<sup>3</sup>, В. А. Трусов<sup>4</sup>, Н. К. Юрков<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> ra4foc@yandex.ru, <sup>3</sup> luysenko\_av@bk.ru, <sup>4</sup> kipra@mail.ru, <sup>5</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В процессе проектирования, тестирования и использования электронных устройств часто обязательным является применение специализированных температурных измерительных приборов. В зависимости от стадии жизненного цикла электронного оборудования могут использоваться различные типы измерителей, основанные на разных физических принципах работы. Современная метрология выделяет два фундаментальных подхода к измерению температуры – это контактный метод (с непосредственным взаимодействием с объектом) и бесконтактный метод (неразрушающий контроль). В рамках данного исследования основное внимание сосредоточено на бесконтактной методике измерений, причем проводится детальный анализ двух различных типов бесконтактных измерительных устройств, каждый из которых обладает уникальными характеристиками и областями применения. *Материалы и методы.* В основе исследования лежат теоретические и практические аспекты процесса неразрушающего контроля температуры и методология теплофизического проектирования радиоэлектронной аппаратуры и приборов. *Результаты и выводы.* Подробно рассмотрены достоинства и недостатки пирометрических и тепловизионных бесконтактных измерителей температуры. Приведен пример современного интегрального пирометрического измерителя, а также рассмотрены два самых распространенных электронных прибора для бесконтактного проведения температурных измерений – пирометр и тепловизор. В заключении авторы обосновывают применение информационно-измерительной системы неразрушающего контроля температуры при конструировании радиоэлектронных средств, совместно с программными средствами теплофизического проектирования.

**Ключевые слова:** тепло, поток, излучение, температура, объект, пирометр, тепловизор

**Для цитирования:** Бейсембаева Б. С., Горячев Н. В., Лысенко А. В., Трусов В. А., Юрков Н. К. Средства реализации бесконтактного способа измерения температуры при неразрушающем контроле тепловых режимов радиоэлектронных средств // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 47–54. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-5

## MEANS OF IMPLEMENTING A NON-CONTACT METHOD FOR MEASURING TEMPERATURE DURING NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THERMAL MODES OF ELECTRONIC MEANS

B.S. Beisembayeva<sup>1</sup>, N.V. Goryachev<sup>2</sup>, A.V. Lysenko<sup>3</sup>, V.A. Trusov<sup>4</sup>, N.K. Yurkov<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> ra4foc@yandex.ru, <sup>3</sup> luysenko\_av@bk.ru, <sup>4</sup> kipra@mail.ru, <sup>5</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Abstract.** *Background.* In the process of designing, testing and using electronic devices, the use of specialized temperature measuring devices is often mandatory. Depending on the stage of the life cycle of electronic equipment, different types of meters based on different physical principles of operation can be used. Modern metrology identifies two fundamental approaches to temperature measurement: the contact method (with direct interaction with an object) and the non-contact method (non-destructive testing). This study focuses on contactless measurement techniques, and provides a detailed analysis of two different types of contactless measuring devices, each with unique characteristics and applications. *Materials and methods.* The research is based on the theoretical and practical aspects of the process of non-destructive temperature control and the methodology of thermophysical design of electronic equipment and devices. *Results and conclusions.* The advantages and disadvantages of pyrometric and thermal non-contact temperature meters are considered in detail, an example of a modern integrated pyrometric meter is given, and two of the most common electronic devices for non-contact temperature measurements are considered – a pyrometer and a thermal imager. In conclusion, the authors substantiate the use of an information and measuring system for non-destructive temperature control in the design of radioelectronic devices, together with software tools for thermophysical design.

**Keywords:** heat, flow, radiation, temperature, object, pyrometer, thermal imager

**For citation:** Beisembayeva B.S., Goryachev N.V., Lysenko A.V., Trusov V.A., Yurkov N.K. Means of implementing a non-contact method for measuring temperature during non-destructive testing of thermal modes of electronic means. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):47–54. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-5

### Введение

Современные тенденции развития радиоэлектронной аппаратуры характеризуются неуклонным сокращением габаритов как готовых устройств, так и их компонентной базы. Этот процесс микроминиатюризации существенно усложняет задачу эффективного теплоотвода от нагреваемых элементов конструкции. В ответ на эти технологические вызовы разрабатываются инновационные системы терморегулирования, использующие как принципиально новые физические подходы, так и модернизированные традиционные решения, в частности – усовершенствованные системы воздушного охлаждения, основанные на конвекционном теплообмене. Для объективной оценки эффективности таких охлаждающих систем требуется точный и достоверный температурный мониторинг их рабочих параметров в реальных условиях эксплуатации. На практике это реализуется посредством контактных измерительных систем контроля температуры. Однако современные контактные методики температурных измерений имеют существенные технологические ограничения, что в ряде случаев снижает достоверность проводимых исследований характеристик систем охлаждения и затрудняет получение репрезентативных результатов.

Ключевые проблемы существующих контактных методов включают:

- ограниченную точность измерений в условиях микроминиатюризации;
- возможность искажения температурного поля объекта измерения;
- технологические сложности установки датчиков на микрообъекты;
- ограниченный диапазон рабочих температур;
- недостаточную скорость реакции на температурные изменения.

Эти факторы обуславливают необходимость разработки новых подходов к температурному мониторингу, сочетающих преимущества контактных и бесконтактных методов измерений.

Габариты современных электронных компонентов зачастую сопоставимы или даже значительно меньше размеров стандартных контактных температурных датчиков, что неизбежно приводит к искажению результатов измерений. Хотя бесконтактные методы измерения температуры также имеют определенные ограничения [1], главным из которых является сравнительно меньшая чувствительность из-за зависимости от уровня теплового излучения объекта. В рамках данной работы

основное внимание уделено анализу бесконтактных методов температурного контроля, основанных на современных средствах и технологиях измерений, а также практическим аспектам реализации термического мониторинга [2, 3].

**Постановка проблемы.** Проблемой, на решение которой направлено исследование, является обоснование выбора средств неразрушающего контроля и измерения температуры деталей и узлов радиоэлектронных средств.

### Теоретическая база бесконтактного измерения температур

Любое физическое тело обладает способностью излучения электромагнитной энергии, на интенсивность которого влияет его температура. В свою очередь значение температуры можно вычислить, исходя из количественных характеристик теплового потока. Именно на этом основывается бесконтактный метод измерения температуры. Суть его заключается в следующем. Исследуемый источник тепла излучает в окружающую атмосферу тепловой поток, который на определенном расстоянии улавливается датчиком-приемником, чувствительным элементом прибора для измерения температуры на расстоянии. Основных видов таких приборов два: пирометр и тепловизор.

Точность измерения напрямую зависит от множества составляющих:

- 1) объект, температура которого измеряется на расстоянии, должен находиться в прямой видимости теплового датчика;
- 2) датчику не должно ничего препятствовать на пути его луча к изучаемому объекту. Разнообразные предметы, атмосферные условия (туман, пыль, пар) могут негативно сказаться на точности измерения. Также следует уделить особое внимание чистоте оптических компонентов прибора, они не должны быть никак загрязнены;
- 3) на температурные показания влияют структура и физическое состояние исследуемой поверхности. Данное влияние четко прослеживается на рис. 1, на котором приводятся характеристики разных оттенков: черного, серого и цветного.

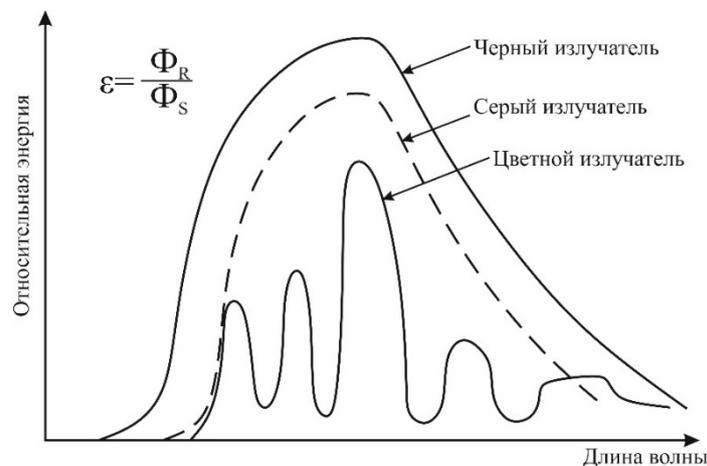


Рис. 1. Коэффициент излучения материала

Инфракрасное излучение черного излучателя  $\Phi_S$  выступает в качестве исходной точки, равной единице, от которой ведется вычисление коэффициентов излучения других веществ и физических тел  $\Phi_R$ . Исходя из принятого значения, все другие показания автоматически становятся равными меньше исходной величины. На данном принципе основывается работа всех приборов для бесконтактного измерения температуры. Другими словами, в реальных условиях эксплуатации все пирометры и тепловизоры выводят конечное значение температуры, вычисленное на основе идеального показателя. Не стоит забывать и о том, что на точность измерения, помимо перечисленных выше составляющих, оказывают влияние реальная температура изучаемого тела, а также длина волны инфракрасного спектра, которая и является важнейшей составляющей замера.

Таким образом, бесконтактные методы измерения температуры основаны на регистрации теплового излучения объектов без физического контакта с ними. Они нашли широкое применение в промышленности, медицине, энергетике и научных исследованиях. Выделяют следующие способы бесконтактного измерения температуры:

- 1) пирометрия (инфракрасное измерение температуры);
- 2) термография (тепловизоры);
- 3) оптические методы (спектроскопия, интерферометрия);
- 4) акустические методы (ультразвуковая термометрия);
- 5) радиометрические методы (микроволновая термометрия).

### Принцип построения пирометрического измерителя

Обобщенно состав пирометрических измерителей или пирометров можно представить четырьмя блоками:

- 1) приемного ИК-датчика, оснащенного оптикой и системой зеркал;
- 2) набора электронных компонентов для принятия и обработки информации;
- 3) экрана для отображения полученных значений;
- 4) кнопок включения и управления прибором.

Измерение температуры в пирометре происходит в два этапа. Сначала система оптики «ловит» тепловой поток и с помощью зеркального механизма отправляет его на датчик, производящий преобразование тепла в электрический сигнал. Затем данный сигнал передается в главное электронное устройство, в котором производятся все необходимые вычисления и вывод полученного значения на экран пирометра.

В первом приближении можно предположить, что измерение температуры с помощью пирометра – это очень просто и все, что нужно сделать, это навести его на объект измерения и нажать на кнопку. Отчасти это верно, если точность измерения не имеет большого значения и погрешность измерения в несколько градусов не является проблемой [4]. Однако если необходимо получить максимально точные показания, то необходимо учесть не только описанные в статье факторы, но и расстояние от прибора до изучаемого объекта (рис. 2) [5]. Последнее, в свою очередь, зависит от оптического разрешения устройства.

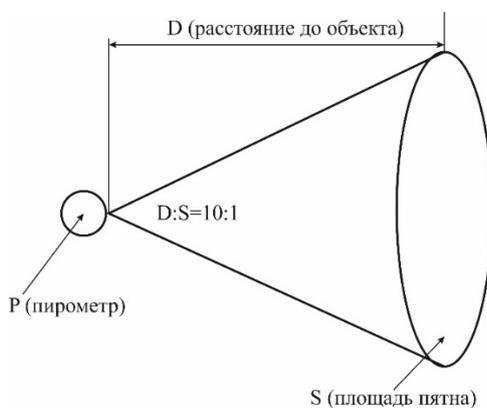


Рис. 2. Оптическое разрешение пирометра

Разновидностей моделей пирометров и их производителей в мире достаточно много, и каждый из них желает привнести в свой образец что-то уникальное, что выгодно выделило бы его устройство на фоне остальных. Одним из результатов подобных изысканий стали различные углы обзора в разных моделях. Для комфорта использующего прибор человека данная характеристика является отношением расстояния до объекта к площади пятна, образующегося на поверхности этого объекта при непосредственном измерении [6]. Так как обе величины находятся в прямой зависимости друг от друга, точность получаемых значений тесно связана как с точностью наведения на объект, так и с правильностью подбора расстояния для определения площади измерения. Правильно подобрав эти два параметра, обработка тепловых потоков системой оптики будет производиться максимально корректно, на нее не будут влиять посторонние, оказавшиеся рядом, предметы и другие отвлекающие факторы. С целью упростить вычисления и подбор правильных расстояний простыми пользователями большинство моделей пирометров в наши дни оснащаются лазерными указателями, проецирующими небольшую точку на объекте измерения, что, несмотря на всю простоту решения, в разы упрощает использование прибора [7].

Ранее реализация пирометров представляла достаточно сложную инженерную работу. Это прежде всего связано со сложностью оптической системы этих устройств. Между тем прогресс в микроэлектронике и обработке сигналов позволил сделать эти приборы более доступными.

Ярким представителем пирометрических измерителей является инфракрасный термометр MLX90614. Этот интегральный измеритель выполнен в корпусе ТО-39, имеет четыре вывода. В верхней грани находится кремниевая линза, предназначенная для фокусировки регистрируемого излучения. В конструкцию данного ИК-термометра может включаться рефракционный фильтр, предназначенный для ограничения угла обзора чувствительного элемента (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид измерителя MLX90614:  
а – без рефракционного фильтра; б – с рефракционным фильтром

Данный пирометрический измеритель может измерять температуру в диапазоне от  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Питание осуществляется от постоянного тока напряжением от 2,6 до 5,5 В. Имеет в своем составе энергонезависимую память (EEPROM), мощный цифровой сигнальный процессор и 16-битный АЦП. Связь между измерителем и устройством обработки может осуществляться посредством шины I2C или с использованием широтно-импульсной модуляции. Кроме того, у MLX90614 имеется два цифровых фильтра.

### Принцип построения тепловизионного измерителя

Большинство людей привыкло думать, что устройство тепловизора в разы сложнее устройства пирометра, однако в общем виде отличий у них не так уж и много. Основным и главным из них является гибридная микросхема, работающая в качестве приемника теплового излучения [8]. Инфракрасное излучение воспринимается эпитаксиальным слоем, обладающим высокой фоточувствительностью, и проникает дальше через сильнолегированную подложку. Схематичное изображение ИК-приемника с гибридной микросхемой представлено на рис. 4.

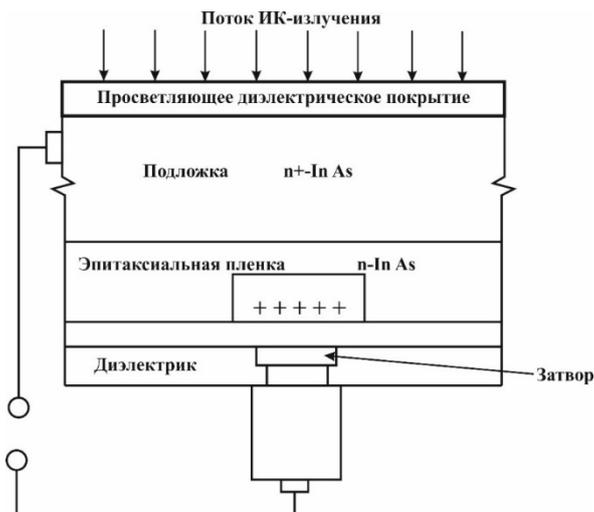


Рис. 4. Устройство приемника тепловизора

Точность измерения в тепловизорах, оснащенных матричными детекторами, достигает 0,1 град., что является очень большим преимуществом перед более простыми по своей конструкции пирометрами. Такая точность зачастую и не требуется обычным пользователям, поэтому тепловизоры применяются как в стационарных лабораторных установках [9, 10], так и в переносном виде [6].

Существуют, конечно, и ручные тепловизоры, принцип работы с которыми не сильно отличается от работы с пирометром. Информация также выводится на встроенный экран, но не в виде сухих цифр, а в виде мультимедийного изображения, на котором виден объект исследования и все его зоны с разными степенями нагрева. Рядом с изображением всегда присутствует шкала, позволяющая сопоставить видимые на дисплее цвета с реальными показаниями температуры. Суммируя все вышесказанное, можно с уверенностью сказать, что тепловизор позволяет провести более углубленный анализ всех составляющих исследуемого объекта, в то время как пирометр лишь покажет примерную температуру в области, на которую направлен его датчик.

### Заключение

Приведенные в данной работе устройства являются самыми распространенными устройствами для бесконтактного измерения температуры. Оба они мобильны, обладают встроенными аккумуляторами и небольшими габаритами, чтобы их комфортно можно было использовать в ручном режиме и при необходимости взять с собой на удаленное место работы.

Сфера применения данных устройств существенно шире простого измерения тепловых параметров. В частности, современный ассортимент включает специализированные низкотемпературные модификации, обладающие ключевыми особенностями, обеспечивающими преимущества перед контактным измерением температур. Сравнение различных способов бесконтактного измерения температур приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение способов измерения температур

Метод	Диапазон температур	Точность	Применение
Пирометрия	-50 °С ... +3000 °С	±1...5 %	Промышленность, медицина
Термография	-20 °С ... +2000 °С	±2 %	Диагностика, энергетика
Оптические	100 °С ... 5000 °С	Высокая	Наука, высокотемпературные процессы
Акустические	-50 °С ... +500 °С	±1 °С	Жидкости, газы
Радиометрические	-100 °С ... +1000 °С	±2...5 %	Метеорология, медицина

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что пирометры и тепловизоры как устройства, реализующие бесконтактный способ измерения температуры, являются крайне востребованными приборами. Между тем их недостатки могут существенно ограничить сферу их применения, в частности, при исследовании новых конструкций радиоэлектронной аппаратуры, в которой прямой доступ к тепловыделяющим элементам закрыт элементами конструкции или другими деталями [10, 11].

В этих условиях остро встает необходимость создания универсального измерителя температур, объединяющего как бесконтактный, так и контактный способ измерения, подробно рассмотренный в работах [9, 12]. Для создания подобного измерителя необходимо использовать методологию построения проблемно-ориентированных информационно-измерительных систем [13]. Это позволит обеспечить единство измерений при использовании нескольких измерительных каналов одной величины, но функционирующих на разных физических принципах. Исходя из этого, на начальных стадиях проектирования и проектирования радиоэлектронных средств, содержащих теплонагруженные элементы, подобная информационно-измерительная система станет основным инструментом, позволяющим путем натурального эксперимента обосновать конструкторские решения. Такая система, логично дополняя программные средства теплофизического проектирования [14], расширяет потенциальные возможности конструктора.

### Список литературы

1. Proshin A., Melnichuk A., Gerasimova Yu., Yurkov N. Principle of operation and means of implementing a non-contact method of temperature measurement // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сб. тр. XVII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Сочи, 1–10 октября 2020 г.) / под ред. С. У. Увайсова. М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н. Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2020. Р. 440–444. EDN: KZQIGD
2. Семенцов С. Г., Гриднев В. Н., Сергеева Н. А. Исследование влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры тепловизионными методами // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 2. С. 6–10.

3. Гарелина С. А., Латышенко К. П., Фрунзе А. В. Сравнительный анализ энергетических пирометров и пирометров спектрального отношения // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2017. Т. 1, № 8. С. 417–420.
4. Гуляев И. П., Долматов А. В., Бересток Г. М. Оптимизация температурных измерений спектральным пирометром на базе MATLAB // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. 2016. Т. 1, № 6. С. 201–207.
5. Веснин В. И., Прилепский А. С. Погрешности измерения температуры инфракрасным пирометром // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность : сб. ст. Самара, 2017. С. 177–181.
6. Семешина Н. И., Гришина С. Ю. Тепловизор в строительстве // Студенчество России: век XXI : сб. материалов III молодеж. науч.-практ. конф. Орел, 2016. С. 311–312.
7. Кабаева О. Н., Садовников И. В. Тепловизор в современном мире // Научная дискуссия: вопросы технических наук. 2016. № 2. С. 76–81.
8. Кошкин С. Ю. Тепловизор. Критерии выбора // Водоочистка. 2019. № 7. С. 47–53.
9. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 1984. 247 с.
10. Горячев Н. В. Тепловая модель сменного блока исследуемого объекта // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 263. EDN: PCBXGH
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, September 21–26, 2016). Bristol : IOPscience, 2017. P. 012130. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012130 EDN: YVQINH
12. Горячев Н. В., Юрков Н. К. Совершенствование структуры современного информационно-измерительного комплекса // Инновационные информационные технологии. 2013. № 2-3. С. 433–436. EDN: QCWBSP
13. Горячев Н. В., Граб И. Д., Лысенко А. В., Юрков Н. К. Структура автоматизированной лаборатории исследования теплоотводов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2011. Т. 2. С. 119–120. EDN: NWZBOT
14. Горячев Н. В., Юрков Н. К. Программные средства теплофизического проектирования печатных плат электронной аппаратуры // Молодой ученый. 2013. № 10. С. 128–130. EDN: RHJJSJ

### References

1. Proshin A., Melnichuk A., Gerasimova Yu., Yurkov N. Principle of operation and means of implementing a non-contact method of temperature measurement. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: sb. tr. XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Sochi, 1–10 oktyabrya 2020 g.) = Innovative, information and communication technologies : proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference (Sochi, October 1-10, 2020)*. Moscow: Assotsiatsiya vypusknikov i sotrudnikov VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo sodeystviya sokhraneniyu istoricheskogo i nauchnogo naslediya VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo, 2020:440–444. EDN: KZQIGD
2. Sementsov S.G., Gridnev V.N., Sergeeva N.A. Investigation of the influence of temperature conditions on the reliability of electronic equipment by thermal imaging methods. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;2:6–10. (In Russ.)
3. Garelina S.A., Lатышенко K.P., Frunze A.V. Comparative analysis of energy pyrometers and spectral ratio pyrometers. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy = Fire safety: problems and prospects*. 2017;1(8): 417–420. (In Russ.)
4. Gulyaev I.P., Dolmatov A.V., Berestok G.M. Optimization of temperature measurements with a spectral pyrometer based on MATLAB. *Mnogoyadernye protsessory, parallel'noe programmirovaniye, PLIS, sistemy obrabotki signalov = Multi-core processors, parallel programming, FPGAs, signal processing systems*. 2016;1(6):201–207. (In Russ.)
5. Vesnin V.I., Prilepskiy A.S. Errors in measuring temperature with an infrared pyrometer. *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Estestvennye nauki i tekhnosfernaya bezopasnost': sb. st. = Traditions and innovations in construction and architecture. Natural sciences and technosphere safety : collection of articles*. Samara, 2017:177–181. (In Russ.)
6. Semeshina N.I., Grishina S.Yu. Thermal imager in construction. *Studenchestvo Rossii: vek XXI: sb. materialov III molodezh. nauch.-prakt. konf. = Russian students: Century XXI : collection of materials of the III youth. scientific and practical conference*. Orel, 2016:311–312. (In Russ.)
7. Kabaeva O.N., Sadovnikov I.V. Thermal imager in the modern world. *Nauchnaya diskussiya: voprosy tekhnicheskikh nauk = Scientific discussion: issues of technical sciences*. 2016;(2):76–81. (In Russ.)
8. Koshkin S.Yu. Thermal imager. Selection criteria. *Vodoochistka = Water treatment*. 2019;(7):47–53. (In Russ.)
9. Dul'nev G.N. *Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature: uchebnyk dlya vuzov = Heat and mass transfer in radioelectronic equipment : textbook for universities*. Moscow: Vyssh. shk., 1984:247. (In Russ.)
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.). EDN: PCBXGH

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, September 21–26, 2016)*. Bristol: IOPscience, 2017:012130. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012130 EDN: YVQINH
12. Goryachev N.V., Yurkov N.K. Improving the structure of a modern information and measurement complex. *Innovatsionnyye informatsionnye tekhnologii = Innovative information technologies*. 2013;(2-3):433–436. (In Russ.). EDN: QCWBSP
13. Goryachev N.V., Grab I.D., Lysenko A.V., Yurkov N.K. The structure of the automated laboratory for heat sink research. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2011;2:119–120. (In Russ.). EDN: NWZBOT
14. Goryachev N.V., Yurkov N.K. Software tools for thermophysical design of printed circuit boards of electronic equipment. *Molodoy uchenyy = Young scientist*. 2013;(10):128–130. (In Russ.). EDN: RHJJSJ

### 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

**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

**Алексей Владимирович Лысенко**

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

**Василий Анатольевич Трусов**

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

**Николай Кондратьевич Юрков**

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

**Bakytgul S. Beisembayeva**

Senior lecturer of the sub-department  
of aviation engineering and technology,  
Academy of Civil Aviation  
(44 Akhmetov street, Almaty, Kazakhstan)

**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)

**Aleksey V. Lysenko**

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

**Vasily A. Trusov**

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)

**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 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 05.05.2025**

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАКОЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

В. Н. Китаев<sup>1</sup>, Р. Л. Афанасьев<sup>2,3</sup>, М. В. Петров<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт  
технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия  
<sup>1,2,3</sup> kb2@vniitf.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Разработанный накольный механизм относится к устройствам инициирования взрывных устройств, используемых для ликвидации возникающих на реках во время весеннего паводка ледовых заторов, обычно представляющих собой хаотичные нагромождения бесформенных льдин, когда ударные ускорения при встрече с преградой по направлению равновероятны в телесном угле  $\Omega = 2\pi$  стерадиан, т.е. в полусфере. *Материалы и методы.* Основная особенность разработанной конструкции накольного механизма, отличающая его от устройств аналогичного назначения, – использование дополнительной магнитной системы, позволяющей повысить скорость перемещения ударника в конце его хода за счет дополнительной ускорения ударника магнитной системой. Кинетическая энергия ударника, затрачиваемая на сжатие цилиндрической пружины, восполняется магнитной системой, обеспечивая надежное задействие капсуля-детонатора. Это дополнительное притяжение не зависит от скорости встречи объекта использования с преградой, следовательно, и от величины возникающего при этом ударного ускорения, поэтому накольный механизм надежно сработает как при больших, так и малых скоростях встречи устройства с преградой. Выполнение инерционного тела в виде шара и установка его между торцевой плоской поверхностью ударника и конической поверхностью корпуса обеспечивает передачу на осевой ударник сил инерции шара как при его осевом, так и боковом перемещении (при наличии соответствующих ударных ускорений). Использование в накольном механизме опоры качения в виде обоймы с размещенными в ней по окружности шариками позволяет исключить трение скольжения инерционного тела (шара) и обеспечить надежное срабатывание накольного механизма при встрече устройства с преградой с малыми скоростями под любыми углами (при ударных ускорениях в любых боковых направлениях). *Результаты и выводы.* Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного накольного механизма, обеспечивающего надежное срабатывание при встрече с преградой со сложной поверхностью под различными углами и с малыми скоростями.

**Ключевые слова:** накольный механизм, инерционное тело, надежность срабатывания, пространственная диаграмма срабатывания, математическая модель, дифференциальные уравнения

**Для цитирования:** Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель накольного механизма // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 56–62. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-6

## MATHEMATICAL MODEL OF THE PIERCING MECHANISM

V.N. Kitaev<sup>1</sup>, R.L. Afanasyev<sup>2,3</sup>, M.V. Petrov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute  
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia  
<sup>1,2,3</sup> kb2@vniitf.ru

**Abstract.** *Background.* The piercing mechanism (piercer) developed is a device of blast initiation for removing ice obstruction in rivers during spring freshet with chaotic piles of formless blocks of ice, when impact accelerations at barriers contact are equiprobable in the line at a solid angle  $\Omega = 2\pi$  steradians, i.e. in a hemisphere. *Materials and methods.* Major feature of developed design of the piercing mechanism to differ it from similar devices is use of magnetic system, increasing the speed of striker acceleration at the end of its travel thanks to additional acceleration of the striker by the magnet system. Kinetic energy of the striker spent for cylinder spring compression is compensated by the magnetic system, enabling reliable initiation of a blasting cap. Such additional attraction depends neither on rate of the contact of the body with obstacle, consequently nor on the value of initiated acceleration, and so the piercing mechanism will snap into action both at high and low rates of the contact with the obstacle. Ball-form of the inertial body as well as its location between flat face of the striker and conic surface of the package provide transfer of the ball inertia to axial striker both at its axial and lateral travel (at presence of appropriate impact accelerations). Use of rolling contact bearing in the form of ball racer eliminates sliding friction of the inertial body (sphere) and guarantee reliable initiation of the piercing mechanism at a contact of the device with an obstacle with low rate at different angle (with impact accelerations at any of side directions). *Results and conclusions.* Submitted work demonstrates possibility of

designing of reliable and technologically effective piercing mechanism for the contact with an obstacle of complex form at different angles, and at low rate.

**Keywords:** piercing mechanism, inertial body, reliable response, spatial response diagram, mathematical model, differential equation

**For citation:** Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of the piercing mechanism. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(2):56–62. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-6

### Назначение накольного механизма

Разработанный накольный механизм относится к устройствам инициирования взрывных устройств, используемых для ликвидации возникающих на реках во время весеннего паводка ледовых заторов, обычно представляющих собой хаотичные нагромождения бесформенных льдин, когда ударные ускорения при встрече с преградой по направлению равновероятны в телесном угле  $\Omega = 2\pi$  стерадиан, т.е. в полусфере.

Техническое решение накольного механизма обеспечило повышение надежности срабатывания при встрече с преградой со сложной поверхностью под различными углами и с малыми скоростями.

### Конструкция накольного механизма

Конструкция накольного механизма представлена на рис. 1–5.

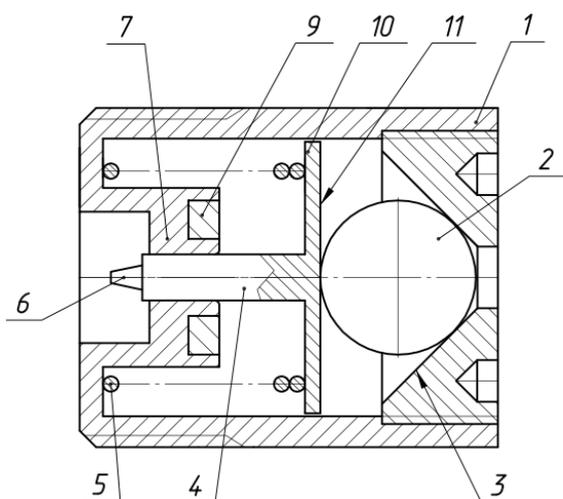


Рис. 1. Накольный механизм в исходном состоянии

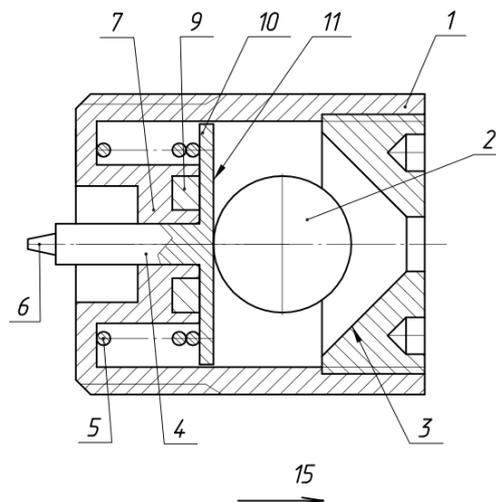


Рис. 2. Накольный механизм при ударном ускорении в осевом направлении

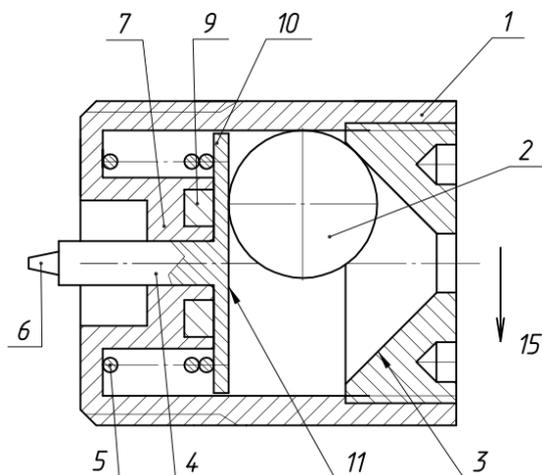


Рис. 3. Накольный механизм при ударном ускорении в поперечном направлении

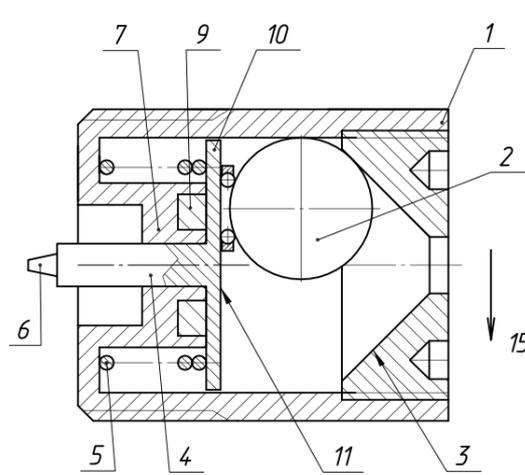


Рис. 4. Накольный механизм с трением качения инерционного тела (шара) при ударном ускорении в поперечном направлении

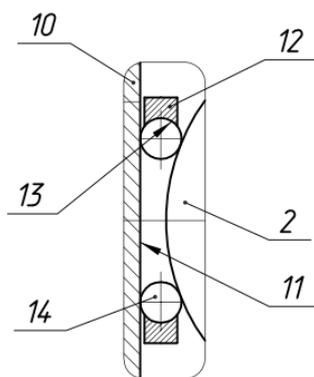


Рис. 5. Опора, обеспечивающая трение качения инерционного тела (шара) при ударном ускорении в боковом направлении

Устройство выполнено следующим образом.

Накольный механизм (рис. 1–3) содержит корпус 1 с установленным в нем инерционным осевым ударником 4, инерционное тело в виде шара 2. Осевого ударника 4 имеет с одного торца накольную иглу 6, взаимодействующую с капсулом-детонатором (не показано), и фланец 10 с другого торца, выполненный с плоской торцевой поверхностью, взаимодействующей с шаром, опирающимся на коническую поверхность 3 конического углубления корпуса.

Корпус 1 имеет направленный внутрь его полости осевой цилиндрический выступ 7 с осевым отверстием под ударник 4 и с кольцевой выемкой 8 на торце, в которой закреплен постоянный магнит 9, намагниченный в осевом направлении.

Корпус 1 и ударник 4 выполнены из магнитомягкого металла. Сопрягаемые подвижные поверхности корпуса 1 и ударника 4 для придания им твердости могут быть подвергнуты термохимической обработке, например цементованию или азотированию.

Инерционное тело – шар 2 – выполнено из «тяжелого», например вольфрамового сплава, его масса превосходит массу ударника 4. Указанное техническое решение из-за преобладания массы шара 2 обеспечивает передачу на осевой ударник 4 примерно одинаковых сил инерции как при осевом, так и боковом перемещении шара 2 (при наличии соответствующих ударных ускорений).

Для возможности исключения трения скольжения инерционного тела (шара) и перехода на трение качения, которое обеспечит надежное срабатывание накольного механизма при встрече взрывного устройства с преградой с малыми скоростями при ударном ускорении в боковом направлении в накольный механизм (рис. 4, 5) между инерционным телом (шаром) 2 и фланцем 10 ударника 4 установлена обойма 12 с канавкой 13 на внутренней цилиндрической поверхности с размещенными в ней по окружности шариками 14, опирающимися на торцевую поверхность 11 фланца 10 и поверхность шара 2.

На внешнем диаметре корпуса 1 выполнена резьба для ввинчивания накольного механизма в объект использования (на рисунках не показано).

### Работа накольного механизма

Накольный механизм работает следующим образом.

При потере скорости от встречи взрывного устройства с преградой (ледяными массами) инерционное тело – шар 2 – перемещается по оси (рис. 2) или в боковом направлении (рис. 3), в зависимости от угла встречи с преградой, определяющего направление ударного ускорения 15, и характера поверхности преграды, сдвигая ударник 4 и сжимая пружину 5. В конце хода ударника 4 его фланец 10 «подхватывается» (притягивается) магнитом 9, увеличивая скорость движения ударника 4, а, следовательно, и его кинетическую энергию, обеспечивая надежное задействование капсуля-детонатора.

При условии включения в накольный механизм обоймы 12 (см. рис. 4, 5) инерционное тело – шар 2 – из-за наличия дополнительной опоры в виде обоймы 12 с шариками 14 перемещается всилу ударного ускорения 15 в боковом направлении, без проскальзывания, то есть с малым трением, также обеспечивая надежное задействование капсуля-детонатора при указанных условиях встречи с преградой.

Оснащение накольного механизма установленным в кольцевое углубление 8 цилиндрического выступа 7 магнитом 9, намагниченным в осевом направлении, и выполнение корпуса 1 и ударника 4 из магнитомягкого металла с фланцем 10, взаимодействующим своей плоской торцевой поверхностью 11 с инерционным телом – шаром 2, опирающимся на коническую поверхность 3 конического углубления корпуса 1, позволяет повысить скорость перемещения ударника 4 с накольной иглой 6 в конце его хода за счет дополнительного ускорения ударника 4 магнитом 9. То есть кинетическая энергия ударника 4, затрачиваемая на сжатие цилиндрической пружины 5, восполняется дополнительным притяжением магнитом 9 его фланца 10, обеспечивая надежное задействование капсуля-детонатора. Это дополнительное притяжение не зависит от скорости встречи взрывного устройства с преградой, следовательно, и от величины возникающего при этом ударного ускорения 15, поэтому накольный механизм надежно сработает как при больших, так и малых скоростях встречи взрывного устройства с преградой.

Установка магнита 9 в выемку 8 выступа 7, выполненного из магнитомягкого материала, также обеспечивает меньшее усилие притяжения фланца 10 ударника 4 магнитом 9 при начальных больших зазорах между ними и большее усилие при конечных малых зазорах. Реализуется «падающая» силовая характеристика системы «инерционное тело (шар) 2 – пружина 6 – магнит 9», обеспечивающая надежное задействование капсуля-детонатора накольной иглой 6 ударника 4 при различных скоростях и углах встречи в составе взрывного устройства с преградой.

Выполнение инерционного тела в виде шара 2 и установка его между торцевой плоской поверхностью фланца 10 осевого ударника 4 и конической поверхностью 3 конического углубления корпуса обеспечивает передачу на осевой ударник 4 сил инерции шара 2 как при его осевом, так и боковом перемещении (при наличии соответствующих ударных ускорений).

Использование в накольном механизме обоймы 12, установленной между инерционным телом (шаром) 2 и фланцем 10 толкателя 4 и имеющей канавку 13 на внутренней цилиндрической поверхности с размещенными в ней по окружности шариками 14, опирающимися на торцевую поверхность 11 фланца 10 и поверхность шара 2, позволяет исключить трение скольжения инерционного тела (шара) 2 и перейти на трение качения, которое обеспечит надежное срабатывание накольного механизма при встрече взрывного устройства с преградой с малыми скоростями под любыми углами (при ударных ускорениях в любых боковых направлениях).

Техническое решение накольного механизма защищено патентом РФ [1].

### Математическая модель накольного механизма

Введем прямоугольную систему координат  $OXYZ$ , связанную с корпусом 1. Начало  $O$  системы координат – в начальном положении центра масс шара 3. Направления осей показаны на рис. 6. Орты осей являются правой тройкой векторов.

На рис. 6 показаны силы, действующие на шар 3 и ударник 2.

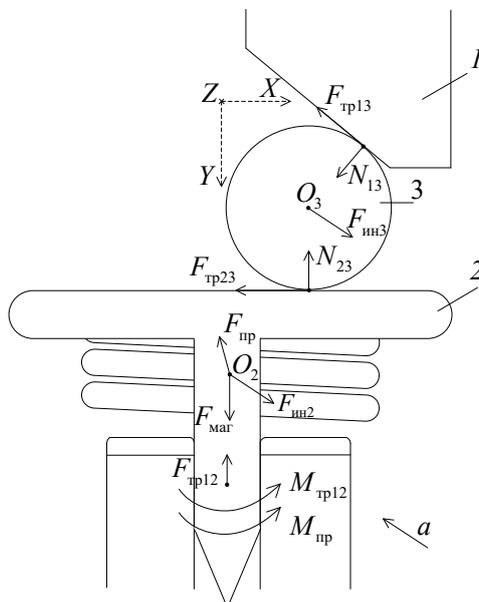


Рис. 6. Силы, действующие на шар и ударник

Координаты центров масс ударника 2 ( $O_2$ ) и шара 3 ( $O_3$ ) – ( $X_2; Y_2; Z_2$ ) и ( $X_3; Y_3; Z_3$ ) соответственно.

*Силы, действующие на шар 3*

Сила инерции  $\vec{F}_{ин3}$  с добавленной силой тяжести

$$\vec{F}_{ин3} = m_3(\vec{g} - \vec{a}), \quad (1)$$

где  $m_3$  – масса шара 3;  $\vec{a}$  – ускорение СЗ в месте расположения шара 3;  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения.

Силы трения  $\vec{F}_{тр13}$  (между поверхностями шара 3 и корпуса 1) и  $\vec{F}_{тр3}$  (между поверхностями шара 3 и фланцем ударника 2) определяются следующим образом:

– при перемещении взаимодействующих поверхностей друг относительно друга:

$$\vec{F}_{тр13} = \mu_c \vec{N}_{13}, \quad (2)$$

$$\vec{F}_{тр23} = \mu_c \vec{N}_{23}, \quad (3)$$

где  $\mu_c$  – коэффициент трения скольжения;  $\vec{N}_{13}, \vec{N}_{23}$  – нормальные составляющие реакций сил давления шара 3 на корпус 1 и шара 3 на фланец ударника 2;

– при отсутствии перемещения взаимодействующих поверхностей друг относительно друга:

$$\vec{F}_{тр13} \leq \mu_n \vec{N}_{13}, \quad (4)$$

$$\vec{F}_{тр23} \leq \mu_n \vec{N}_{23}, \quad (5)$$

где  $\mu_n$  – коэффициент трения покоя.

*Силы, действующие на ударник 2*

Сила инерции  $\vec{F}_{ин2}$  определяется по аналогии с  $\vec{F}_{ин3}$ .

Величина силы упругости пружины  $F_{пр}$  определяется следующим образом:

$$F_{пр} = F_{пр_0} + C_{пр} Y_2, \quad (6)$$

где  $F_{пр_0}$  – начальное усилие пружины;  $C_{пр}$  – жесткость пружины.

Магнитная сила  $\vec{F}_{маг}$  определяется путем интерполяции по таблице ее значений, определенных экспериментально и/или рассчитанных с использованием методов конечно-элементного анализа.

Сила трения  $\vec{F}_{тр12}$  (между поверхностями ударника 2 и корпуса 1) определяется по аналогии с  $\vec{F}_{тр13}$ .

Уравнения движения шара 3 и ударника 2 относительно корпуса 1 запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} m_3 \vec{a}_3 = \vec{F}_{ин3} + \vec{F}_{тр13} + \vec{F}_{тр23} + \vec{N}_{13} + \vec{N}_{23}; \\ m_2 \vec{a}_2 = \vec{F}_{ин2} + \vec{F}_{пр} + \vec{F}_{тр12} + \vec{F}_{маг} + \vec{N}_{12}; \\ \frac{d\vec{L}_2}{dt} = \vec{M}_{пр} + \vec{M}_{тр12}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\vec{a}_3, \vec{a}_2$  – ускорения шара 3 и ударника 2 относительно корпуса 1;  $\vec{L}_2$  – момент количества движения ударника 2;  $\vec{M}_{пр}$  – момент сил, действующих на ударник 2 со стороны пружины;  $\vec{M}_{тр12}$  – момент сил трения, возникающих между поверхностями ударника 2 и корпуса 1.

Система уравнений (7) решается численно при соответствующих начальных условиях. Проведены расчеты, подтвердившие работоспособность СЗ для следующих вариантов ударного нагружения:

- вариант № 1 – ударное ускорение в осевом направлении (вдоль оси  $OX$ );
- вариант № 2 – ударное ускорение в поперечном направлении (вдоль оси  $OY$ ).

### Заключение

Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного накольного механизма, обеспечивающего надежное срабатывание при встрече с преградой со сложной поверхностью под различными углами и с малыми скоростями.

Разработанная математическая модель значительно сократила продолжительность разработки механизма, позволив выбрать еще при выпуске конструкторской документации оптимальные конструктивные параметры. Подобная возможность подтверждается по результатам разработок подобных приборов [2, 3].

### Список литературы

1. Пат. РФ 2822849, МПК F42 С 1/04. Накольный механизм / Китаев В. Н., Уралев А. А., Дремков М. А. № 2024101157 ; заявл. 18.01.2024, опубл. 15.07.2024.
2. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Инерционный включатель с гидравлическим демпфированием инерционного тела // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 88–97. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10
3. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель порогового инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 30–40.

### References

1. Patent Russian Federation 2822849, МПК F42 С 1/04. *Nakol'nyy mekhanizm = Knee mechanism*. Kitaev V.N., Urallev A.A., Dremkov M.A. № 2024101157; appl. 18.01.2024, publ. 15.07.2024. (In Russ.)
2. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Inertial switch with hydraulic damping of an inertial body. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):88–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10
3. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of a threshold inertial switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):30–40. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Владимир Николаевич Китаев

начальник конструкторского отдела,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb@vniitf.ru

#### Роман Львович Афанасьев

заместитель начальника отдела,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

#### Максим Владимирович Петров

инженер,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

#### Vladimir N. Kitaev

Head of the design department,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

#### Roman L. Afanasyev

Deputy head of department,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

#### Maksim V. Petrov

Engineer,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 04.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 14.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 02.05.2025**

## ОЧУВСТВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОАППАРАТУРЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА

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

<sup>1</sup> Военный инновационный технополис «Эра», Анапа, Россия

<sup>2</sup> Научно-производственное объединение «Аванти», Казань, Россия

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

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Для решения задачи очувствления технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов (РТК) через комплексирование сенсорной информации предлагается процедура мониторинга как составной части системы технического обслуживания и ремонта, основанной на проактивной концепции. *Материалы и методы.* С использованием метода ассоциативной аналогии проведено сравнение детерминированного по времени процесса снижения производительности функционирования РТК с ухудшением работоспособности человека, что предоставляет возможность оценивать техническое состояние по обобщенному параметру, характеризующему энергоэффективность РТК с использованием нечеткого логического вывода. *Результаты и выводы.* В процессе имитации такой когнитивной функции человека, как восприятие самочувствия, реализовано численное оценивание системой управления комплекса своего текущего технического состояния.

**Ключевые слова:** мобильный робототехнический комплекс, электроаппаратура, мониторинг технического состояния, нечеткий логический вывод

**Для цитирования:** Заяра А. В., Данилин М. Е. Очувствление технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов для решения задач мониторинга // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 63–70. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-7

## SENSITIVITY OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES FOR SOLVING MONITORING TASKS

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

<sup>1</sup> Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russia

<sup>2</sup> Scientific and Production Association "Avanti", Kazan, Russia

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

**Abstract.** *Background.* To solve the problem of sensing the technical condition of the electrical equipment of mobile robotic complexes through the integration of sensory information, a monitoring procedure is proposed as an integral part of a maintenance and repair system based on a proactive concept. *Materials and methods.* Using the method of associative analogy, a comparison of the time-deterministic process of reducing the performance of the robotics complex with a deterioration in human performance has been carried out, which makes it possible to assess the technical condition according to a generalized parameter characterizing the energy efficiency of the RTK using fuzzy logical inference. *Results and conclusions.* In the process of simulating such a cognitive function of a person as the perception of well-being, a numerical assessment of the complex's current technical condition by the control system is implemented.

**Keywords:** mobile robotic complex, electrical equipment, monitoring of technical condition, fuzzy logical conclusion

**For citation:** Zayara A.V., Danilin M.E. Sensitivity of the technical condition of electrical equipment of mobile robotic complexes for solving monitoring tasks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):63–70. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-7

### Введение

Основным содержанием современных мобильных робототехнических комплексов (РТК) является сложная электроаппаратура различных видов, на которую в процессе эксплуатации воздействуют деструктивные факторы. Под их влиянием в самой аппаратуре происходят необратимые деградиационные процессы, приводящие в конечном счете к наступлению отказов [1]. Восстановление работоспособного состояния требует значительных трудозатрат и высокой квалификации специалистов. Своевременное оповещение эксплуатанта о наступлении предельного состояния<sup>1</sup>, которое может возникнуть как в результате внутренних процессов старения, так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования, является актуальной задачей.

На этом основании исследования, направленные на реализацию идеи оценки технического состояния электроаппаратуры мобильных РТК, имеют практическую значимость. Эффективное функционирование мобильных роботов зависит от состояния их электроаппаратуры, поэтому разработка технологий, позволяющих оценивать и интерпретировать ее состояние в режиме реального времени, является ключевой задачей для обеспечения эффективного применения комплексов. Ее решение будет способствовать поиску и применению инновационных подходов к достижению целей технического диагностирования, что, в свою очередь, благотворно повлияет на улучшение ремонтпригодности и долговечности РТК.

Важным аспектом становится организация технической эксплуатации данного принципиально нового вида техники. Хотя уже разработана классификация роботов<sup>2</sup>, для этих комплексов система технической эксплуатации еще не полностью сформирована. При современном, во многом эклектичном подходе к выбору концепции технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) разработчики технических систем часто отдают предпочтение проактивному подходу, который обеспечивает восстановление работоспособности изделия на основе данных о его фактическом техническом состоянии.

### Материалы и методы

Теоретические основы проактивной концепции ТО и Р оборудования постулируют, что изначально все причины неисправностей присутствуют в зачаточном виде во всех технических системах с начала жизненного цикла [2]. Различные факторы (конструктивные, технологические, эксплуатационные) в той или иной мере способствуют эволюции технического состояния [3]. Их совокупное воздействие вызывает ускоренное развитие одного или нескольких дефектов (отказов), которые становятся определяющими по отношению к работоспособности изделия. Назначая операции ТО и Р таким образом, чтобы уменьшить влияние деструктивных факторов, можно поддерживать работоспособное состояние РТК в течение заданного времени. Прежде всего, проактивная концепция базируется на достоверной оценке технического состояния всего комплекса, а в рассматриваемом случае – электроаппаратуры. Тем более современные сенсорные технологии способны обеспечить решение этой задачи в режиме реального времени. Другими словами, приоритетное значение в структуре этой концепции занимает мониторинг технического состояния.

Несмотря на то, что в настоящее время такие нормативные документы, как национальные стандарты, не представляют единого толкования понятия «мониторинг», наиболее корректной видится следующая трактовка<sup>3</sup>. Мониторинг – процесс непрерывного дистанционного контроля технического состояния объекта по определенному алгоритму с накоплением и оценкой полученной информации с целью идентификации текущего состояния объекта. Расширение функциональных разновидностей и метрологических возможностей современных датчиков позволяет контролировать признаки изменения технического состояния электроаппаратуры посредством проприоцептивных сенсоров, предназначенных для измерения параметров внутреннего состояния робота, и получать информацию о внешней среде с помощью экстероцептивных датчиков. Другими словами, если использовать метод аналогии, то эту сенсорную сеть можно сравнить с нервной системой человека. Проприоцептивные датчики аналогичны рецепторам в нашем теле, которые обеспечивают восприятие внутреннего состояния и движения. Экстероцептивные датчики же подобны рецепторам, отвечающим за восприятие

<sup>1</sup> ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 60.0.0.2–2016. Роботы и робототехнические устройства. Классификация.

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

внешней среды. Таким образом, сенсорная информация в полной мере способна обеспечить инструментальную достоверность мониторинга.

Развивая идею сравнения сложной электроаппаратуры современных РТК с живым организмом на основе деятельностного подхода [4], устанавливающего причинно-следственную связь между понятиями «здоровье человека» – «его самочувствие как личностное ощущение комплекса сигналов, поступающих в головной мозг от рецепторов организма» – «работоспособность, которая отождествляется с физической мощностью и оценивается с позиции результатов труда», предлагается аналогия со следующей логической цепочкой: «техническое состояние» – «его вид, характеризуемый фактическими значениями контролируемых параметров: предельное, неработоспособное и др.» – «производительность». Не вызывает сомнения объективность тенденции снижения уровня работоспособности человека с возрастом и уровня производительности промышленного оборудования с течением времени, потому что именно в этом контексте используется этот термин в руководстве по стандарту технического обслуживания для обеспечения надежности<sup>1</sup>.

Если применительно к электроаппаратуре РТК формализовать влияние деградиционных процессов на изменение ее технического состояния как функцию времени, то его ухудшение, вызванное старением, можно выразить характеристикой, отражающей качество объекта через его энергоэффективность [5]. Этими терминами выражается внесистемная величина, условно характеризующая объем (качество) проделанной работы ко времени, за которое она была совершена.

Качественную оценку характеристики «энергоэффективность» в рассматриваемом контексте предлагается отождествить со способностью мобильного РТК выполнять заданные функции при определенном уровне потребления тока аккумуляторной батареи. Этот показатель может снижаться в результате старения электроаппаратуры и влияния других деструктивных факторов. В предлагаемом аспекте энергоэффективность транспортного мобильного РТК будет означать способность системы эффективно передвигаться по различным типам местности и в различных погодных условиях, обеспечивая решение задач по доставке грузов. На эту характеристику будут оказывать влияние скорость перемещения, точность навигации, устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды, автономность работы и прочие параметры, заданные оператором. Например, энергоэффективность транспортного РТК обычно будет ухудшаться при движении по мягкому грунтовому покрытию на основе чернозема во время дождя по сравнению с перемещением по твердой дороге в сухую погоду.

Возвращаясь к мониторингу технического состояния электроаппаратуры, предлагается в качестве обобщенной характеристики, которая могла бы отражать величину потребляемой энергии, вес перевозимого груза, скорость перемещения, условия окружающей среды и, самое главное, характеризовала бы общее техническое состояние комплекса, использовать понятие «нагруженность» [5]. Для электроаппаратуры мобильных РТК транспортного назначения – это характеристика, которая интегрально оценивает техническое состояние в процессе выполнения роботом своих функций и учитывает энергетические показатели (рабочее напряжение, потребляемый ток), температуру окружающей среды и другие параметры, влияющие на производительность и безотказность комплекса.

Очевидно, что необратимые процессы старения электроаппаратуры однозначно окажут влияние на нагруженность. Другими словами, комплекс со значительной выработкой ресурса (времени нахождения в эксплуатации или пробегом) будет иметь худшие показатели энергопотребления, чем новый робот. Аналогичный вывод можно сделать в отношении проявления зарождающегося отказа. Деструктивные факторы, сопровождающие эксплуатацию (дополнительные нагрузки, не предусмотренные проектной документацией, воздействие условий окружающей среды и пр.), в той или иной мере приводят к развитию различных неисправностей. Их определяющее воздействие также будет проявляться через значения нагруженности.

Аппаратные платформы современных мобильных РТК позволяют разместить технологии искусственного интеллекта (ИИ). Следовательно, решение задачи имитации такой когнитивной функции человека, как восприятие собственного самочувствия, вполне реализуемо. Проводя аналогию между очувствлением роботом собственного технического состояния со знакомым каждому человеку понятием личностного восприятия самочувствия, представляется возможность формализовать нагруженность с использованием аппарата нечеткой логики как временную характеристику  $Q(t)$ .

---

<sup>1</sup> SAE JA1011. Руководство по стандарту технического обслуживания для обеспечения надежности (Reliability-Centered Maintenance, RCM).

Внедрение в системы управления РТК современных сенсорных технологий добавило в робототехнический лексикон новый термин «очувствление», которое представляется как процесс интеграции данных, сгенерированных множеством сенсоров для формирования знаний<sup>1</sup>, подразумевающих априорное применение технологий ИИ. В данном аспекте оптимально подходит продукционная модель нечеткого логического вывода, которая позволяет работать с данными, обладающими свойствами неопределенности.

Оценивание нагруженности в процессе применения РТК посредством технологий ИИ предлагается рассматривать как способность системы распознавать изменения в своем техническом состоянии, анализировать, запоминать их и передавать информацию об этих изменениях оператору. Это будет способствовать повышению уровня автономности комплекса в отношении контроля своего функционирования.

Возвращаясь к нагруженности как к внесистемной, интегральной величине, характеризующей на первичном этапе исследований такой энергетический показатель, как величину потребляемого тока  $I(t)$  и параметр производительности – скорость движения  $v(t)$ , предлагается их комплексировать с использованием процедуры нечеткого логического вывода. Первым шагом в направлении реализации этой процедуры является преобразование лингвистических переменных в нечеткие значения. Для этого входные величины в соответствии с правилами нечеткой логики интерпретируются лингвистическими переменными [6]. Введение нечеткости в процедуру мониторинга технического состояния подразумевает оценивание входных величин и самой нагруженности совокупностью термов, которые сопоставляются с некоторой степенью уверенности с определенными интервалами значений выбранных физических величин. Для  $I(t)$  предлагается следующая градация: слабый, средний и большой. Скорость  $v(t)$  оценивается как низкая, средняя и высокая. Далее преобразование лингвистических переменных в нечеткие значения требует присвоить термам конкретные численные границы, которые формируются с применением методов статистической обработки экспертной информации. Каждому терму ставится в соответствие треугольная функция принадлежности. Схема, поясняющая структуру процесса нечеткого логического вывода, представлена на рис. 1.

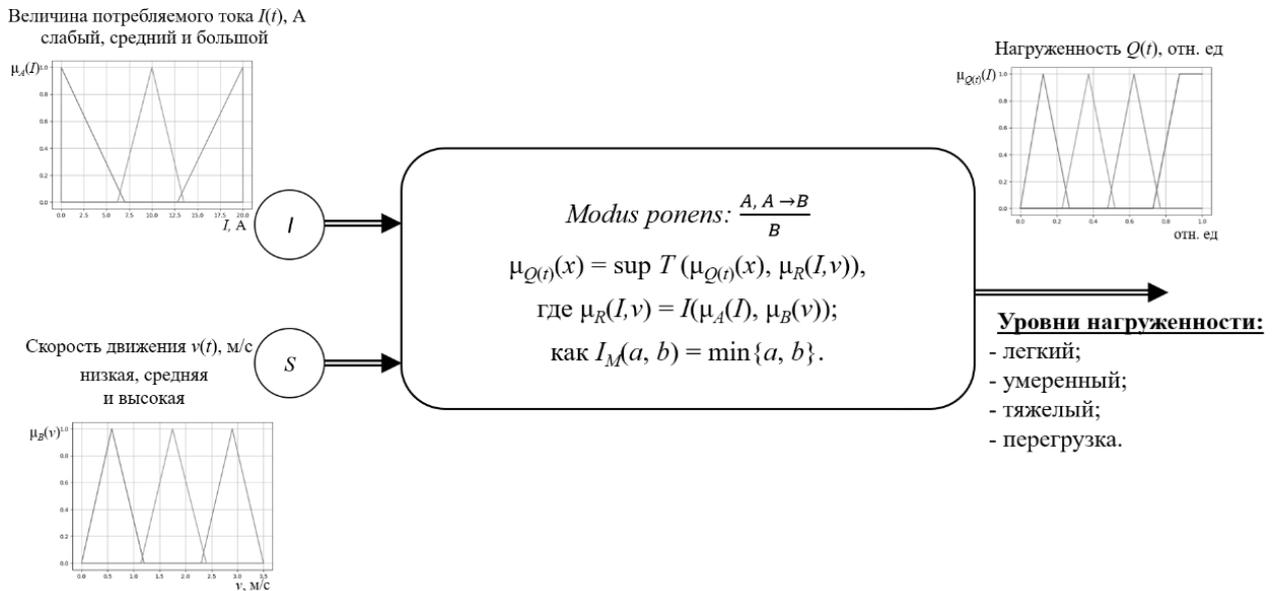


Рис. 1. Схема, поясняющая сущность процедуры оценивания нагруженности с использованием нечеткого логического вывода

Возвращаясь к методу аналогии, предлагается охарактеризовать нагруженность электроаппаратуры робота с использованием приближенных суждений о собственной оценке работоспособности человека (своего самочувствия). Применительно к оцениванию лингвистической переменной «Уровни нагруженности» предлагается логичным применить термы «легкий», «умеренный», «тяжелый» и «критический».

<sup>1</sup> ГОСТ Р 60.6.0.1–2021. Роботы и робототехнические устройства. Сервисные мобильные роботы. Уровни автономности. Термины и определения.

При легкой степени выполняется условие  $0 < Q(t) \leq 0,25$ . Электроаппаратура РТК легко справляется с текущими задачами подобно человеку, который испытывает легкую физическую нагрузку.

Умеренная нагрузка характеризуется работой с «затруднениями» как человек, который выполняет интенсивные физические упражнения. Усталость постепенно накапливается. Значение функции ТС – в интервале  $0,25 < Q(t) \leq 0,5$ .

Тяжело нагруженная система испытывает значительные трудности при выполнении задач и работает с затруднениями как человек, который выполняет физические упражнения с нагрузкой и чувствует накапливающуюся усталость. Значение функции ТС находится в пределах  $0,5 < Q(t) \leq 0,75$ .

Критический уровень сигнализирует о том, что система находится на грани своих возможностей и может перестать функционировать, как человек, который испытывает критическое утомление и может потерять способность продолжать выполнять задачи. Значение функции удовлетворяет условию  $0,75 < Q(t) \leq 1,0$ .

Центральным элементом в процедуре нечеткого вывода является база правил, потому что в ней содержится информация о структуре модели. Именно состоятельность и непротиворечивость базы правил обеспечивает адекватность имитации технологией ИИ переданных от человека знаний по оцениванию технического состояния электроаппаратуры РТК. В полной базе каждому сочетанию входных воздействий соответствует свой терм выходной величины. Полнота базы обеспечивается условием того, что с каждым возможным входным состоянием связано определенное выходное. При этом связка обосновывается логически. В рассматриваемом примере акцент делается именно на отсутствии противоречий и используется неполная база (табл. 1). По этой причине консеквент № 3 «величина потребляемого тока – слабая, а скорость РТК – высокая» противоречит здравому смыслу. Также исключено правило № 6.

Таблица 1

База правил модели нечеткого логического вывода

Номер правила	Входные величины		Нагруженность $Q(t)$
	величина потребляемого тока $I(t)$	скорость движения $v(t)$	
1	Слабый	Низкая	Легкая
2	Слабый	Средняя	Легкая
3	Слабый	Высокая	∅
4	Средний	Низкая	Тяжелая
5	Средний	Средняя	Умеренная
6	Средний	Высокая	∅
7	Большой	Низкая	Критическая
8	Большой	Средняя	Тяжелая
9	Большой	Высокая	Критическая

Затем реализуется непосредственно процедура нечеткого логического вывода с применением нечеткой импликации Мамдани, которая используется для определения отношения «если ..., то ...» между нечеткими множествами. Для оценивания значения нагруженности предлагается применить правило *modus ponens*:  $\frac{A, A \rightarrow B}{B}$ : если истинно высказывание  $A$  и из  $A$  следует  $B$ , то высказывание  $B$  будет тоже истинным [7]. Нечеткая импликация используется для определения отношения между входными данными и выводом. В общем виде процедура формализуется следующим образом:

$$\mu_{Q(t)}(x) = \sup T(\mu_{Q(t)}(x), \mu_R(I, v)),$$

$$\mu_R(I, v) = I(\mu_A(I), \mu_B(v)), \text{ как } I_M(a, b) = \min\{a, b\},$$

где  $\mu_{Q(t)}(x)$  – текущее значение функции принадлежности для нагруженности  $Q(t_i)$ ;  $\sup T$  – верхняя граница треугольной конормы ( $t$ -конормы) объединения функций принадлежности входной и выходной величин  $\mu_R(I, v)$ ;  $I_M(a, b)$  – результат нечеткой импликации по Мамдани, реализующей логическое умножение значений функций принадлежности.

Согласно правилу *modus ponens*, продукция типа «если величины тока и скорости принимают значения  $I(t_i)$  и  $v(t_i)$ , то значение нагруженности принимает вид  $Q(t_i)$ » рассчитывается в следующей последовательности:

- 1) проводится фаззификация: определяются значения функций принадлежности при текущих значениях входных величин  $\mu_A(I(t_i))$  и  $\mu_B(v(t_i))$ ;
- 2) рассчитывается степень истинности предпосылок  $\alpha_j = \min(\mu_A(I(t_i)) \vee \mu_B(v(t_i)))$ ;
- 3) определяется степень истинности следствий  $\mu_{Q(t)_j}(x) = \min(\alpha_j, \mu_{Q(t)_j}(x))$ ;
- 4) строится композиция следствий:  $MF(x) = \max(\mu_{Q(t)_j}(x))$ .

Осуществляется дефаззификация: 
$$x^* = \frac{\int_{\min}^{\max} x MF(x) dx}{\int_{\min}^{\max} MF(x) dx}.$$

Текущему значению нагруженности присваивается  $Q(t_i) = x^*$ .

Все перечисленные процедуры реализованы с использованием подпрограмм на языке *Python* из библиотеки *Skfuzzy*.

Для более корректного применения сформированного аппарата нечеткого логического вывода необходимо определиться с последовательностью действий по предварительной обработке сенсорных данных входных величин и интерпретацией непосредственно самой нагруженности  $Q(t)$ .

Временные ряды  $I(t)$  и  $v(t)$  предлагается подвергнуть процедуре обработки с использованием хорошо апробированного фильтра Калмана [8]. Математическое обоснование применения этого фильтра основывается на тезисе, что модель процесса характеризуется вектором состояния в определенные моменты времени. Оптимальным вариантом можно считать, что этот вектор в процессе применения фильтра должен включать в себя следующие параметры: текущее значение, скорость изменения значения (первая производная) и, по возможности, ускорение изменения значения (вторая производная).

Эти параметры позволяют моделировать динамику изменения показаний датчика и учитывать неопределенность в измерениях. Фильтр Калмана адаптирует состояние системы, используя информацию измерений и модели системы, чтобы предсказывать состояние системы в следующий момент времени с учетом шумов и неопределенности.

Для реализации возможности учета второй производной модели случайного процесса предлагается предварительная интерполяция временного ряда показаний дискретного датчика с использованием кубического сплайна, что позволит в процессе обработки временного ряда более точно оценивать значения второй производной и включать их в вектор состояния фильтра Калмана. Это, в свою очередь, способствует улучшению качества фильтрации и более точной оценке состояния системы на основе показаний цифрового датчика. Графики временных рядов, подвергнутые интерполяции с последующей фильтрацией, представлены на рис. 2. Все процедуры реализованы на языке *Python* с использованием подпрограмм из библиотеки *Pandas* [9].

В процессе имитации такой когнитивной функции, как восприятие самочувствия, воспроизводится попытка оценить свое текущее техническое состояние. Несмотря на динамичность его изменения, осознание должно охватывать определенный промежуток времени. Другими словами, необходимо попытаться имитировать какое-либо примитивное проявление такой человеческой способности, как память.

Исследования, проведенные в этой области, свидетельствуют, что наличие такого механизма, как эпизодическая память, предоставляет возможность хотя бы для реактивного поведения. Речь о выборе действий в соответствии с желаемым результатом пока не идет. Однако наличие памяти, создающей предпосылки для какого-либо планирования действий, может способствовать возникновению нового феномена – феномена сознания [10].

### Результаты и выводы

Результаты исследования подтверждают, что выбор формируется бессознательно и становится осознанным примерно через полсекунды. Исходя из этого, для сглаживания временного ряда нагруженности  $Q(t)$  предлагается использовать оператор простого скользящего среднего с окном продолжительностью 0,5 с. Пример визуализации обобщенной характеристики технического состояния представлен на рис. 2.

Помимо численной оценки качества электроаппаратуры через ее производительность предлагается индикация процесса изменения технического состояния путем сопоставления рассчитанного значения функции  $Q(t)$  из диапазона [0, 1] определенному оттенку спектра видимого диапазона оптического излучения [11, 12]. Легкую степень нагруженности предлагается окрасить в зеленый цвет,

критическому состоянию будет соответствовать темно-красный. Своевременное оповещение оператора о критическом состоянии электроаппаратуры комплекса позволит принять решение о назначении проактивного обслуживания в целях предотвращения перехода объекта в неработоспособное состояние.

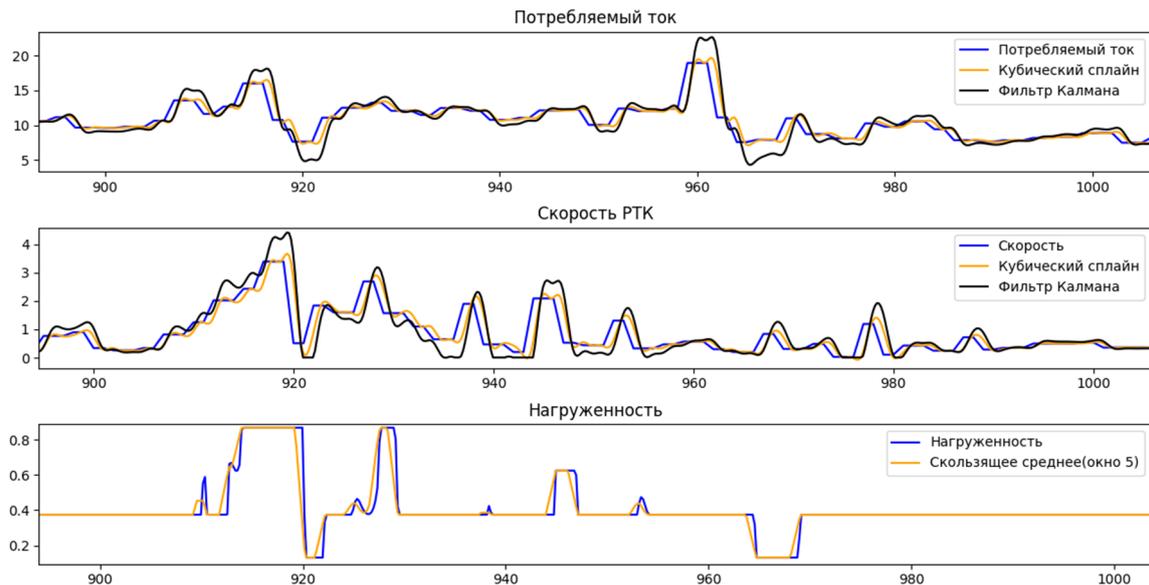


Рис. 2. Графики, поясняющие сглаженные временные ряды входных величин и нагруженности для электроаппаратуры транспортного РТК

Таким образом, одним из направлений создания системы ТО и Р для мобильных РТК, базирующейся на проактивной концепции, является интеграция в систему управления комплексов алгоритмов нечетких вычислений, позволяющих реализовать процедуру мониторинга технического состояния по обобщенному информативному параметру для решения задачи очувствления технического состояния.

### Список литературы

1. Гаскаров Д. В., Голинкевич Т. А., Мозгалецкий А. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / под ред. Т. А. Голинкевича. М. : Сов. радио, 1974. 224 с.
2. Проактивная концепция ТОиР // Ассоциация ЕАМ. URL: <https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html> (дата обращения: 27.05.2024).
3. Закономерности процессов износа деталей и узлов электрооборудования // Снабжение электротехническим оборудованием. URL: <https://www.ess-ltd.ru/diagnostics-electrical/zakonomernosti-protsesov-iznosa/> (дата обращения: 27.05.2024).
4. Стрижакова О. В., Орлов В. А., Фетисов О. Б. Про здоровье, самочувствие и работоспособность человека // Ученые записки университета имени П. Ф. Лесгафта. 2022. № 11. С. 535–539.
5. 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
6. Демидова Г. Л., Лукичев Д. В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб. : Университет ИТМО, 2017. 81 с.
7. Броневиц А. Г., Лепский А. Е. Нечеткие модели анализа данных и принятия решений : учеб. пособие. М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. 264 с.
8. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации : в 2 ч. СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. Ч. 2. 179 с.
9. Interpolating time series in Pandas using Cubic spline // Stack Overflow. URL: <https://stackoverflow.com/questions/13930367/interpolating-time-series-in-pandas-using-cubic-spline> (дата обращения: 08.07.2024).
10. Budson A. E., Richman K. A., Kensinger E. A. Consciousness as a Memory System // Cognitive and Behavioral Neurology. URL: [https://journals.lww.com/cogbehavneurol/fulltext/2022/12000/consciousness\\_as\\_a\\_memory\\_system.5.aspx](https://journals.lww.com/cogbehavneurol/fulltext/2022/12000/consciousness_as_a_memory_system.5.aspx) (дата обращения: 02.11.2024).
11. Грибер Ю. А., Юнг И. Л. Здоровье и болезнь: цветовые ассоциации в современной русской культуре // Человек и культура. 2018. № 5. С. 32–43. doi: 10.25136/2409-8744.2018.5.23491

12. Егжов Д. В., Надейкина Л. А., Терешко П. О. Система поддержки авиапассажиров с использованием технологий мониторинга их местоположения // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 124–129.

### References

- 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.)
- Proactive MRO concept. *Assotsiatsiya EAM = EAM Association*. (In Russ.). Available at: <https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html> (accessed 27.05.2024).
- Patterns of wear processes of parts and components of electrical equipment. *Snabzhenie elektrotekhnicheskim oborudovaniem = Supply of electrical equipment*. (In Russ.). Available at: <https://www.ess-ltd.ru/diagnostics-electrical/zakonomernosti-protsesov-iznosa/> (accessed 27.05.2024).
- Strizhakova O.V., Orlov V.A., Fetisov O.B. About human health, well-being and efficiency. *Uchenye zapiski universiteta imeni P.F. Lesgafta = Scientific notes of the P.F. Lesgaft University*. 2022;(11):535–539. (In Russ.)
- 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 system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):120–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
- Demidova G.L., Lukichev D.V. *Regulyatory na osnove nechetkoy logiki v sistemakh upravleniya tekhnicheskimi ob"ektami = Regulators based on fuzzy logic in control systems of technical facilities*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2017:81. (In Russ.)
- Bronevich A.G., Lepskiy A.E. *Nechetkie modeli analiza dannykh i prinyatiya resheniy: ucheb. posobie = Fuzzy models of data analysis and decision-making : textbook*. Moscow: Izd. dom Vysshey shkoly ekonomiki, 2022:264. (In Russ.)
- Kononov A.A. *Osnovy traektornoy obrabotki radiolokatsionnoy informatsii: v 2 ch. = Fundamentals of trajectory processing of radar information: in 2 parts*. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2014;Pt.2:179. (In Russ.)
- Interpolating time series in Pandas using Cubic spline. *Stack Overflow*. Available at: <https://stackoverflow.com/questions/13930367/interpolating-time-series-in-pandas-using-cubic-spline> (accessed 08.07.2024).
- Budson A.E., Richman K.A., Kensinger E.A. Consciousness as a Memory System. *Cognitive and Behavioral Neurology*. Available at: [https://journals.lww.com/cogbehavneurol/fulltext/2022/12000/consciousness\\_as\\_a\\_memory\\_system.5.aspx](https://journals.lww.com/cogbehavneurol/fulltext/2022/12000/consciousness_as_a_memory_system.5.aspx) (accessed 02.11.2024).
- Griber Yu.A., Yung I.L. Health and disease: color associations in modern Russian culture. *Chelovek i kul'tura = Man and Culture*. 2018;(5):32–43. (In Russ.). doi: 10.25136/2409-8744.2018.5.23491
- Egzhov D.V., Nadeykina L.A., Tereshko P.O. Air passenger support system using location monitoring technologies. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(3): 124–129. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### 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)

#### 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)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 05.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.04.2025

Принята к публикации / Accepted 01.05.2025

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО ВКЛЮЧАТЕЛЯ

В. Н. Китаев<sup>1</sup>, Р. Л. Афанасьев<sup>2</sup>, М. В. Петров<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия  
<sup>1, 2, 3</sup> kb2@vniitf.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Инерционные включатели традиционно используются в подвижных объектах для коммутации электрических цепей технических систем. Срабатывание подобных приборов происходит в основном при наборе интеграла линейного ускорения, с которым объект перемещается в пространстве. Для интегрирования линейного ускорения традиционно используются магнитоиндукционные и гидравлические демпферы. В ряде случаев гидравлические демпферы как упрощающие конструкции инерционных включателей более предпочтительны. В работе представлены результаты разработки конструкции инерционного включателя с гидравлическим демпфированием инерционного тела, приведена его математическая модель – составленные дифференциальные уравнения, описывающие движения подвижных конструктивных элементов, а также условия начала движения. *Материалы и методы.* При составлении дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения: жидкость считаем несжимаемой; изменения размеров деталей инерционного включателя за счет изменения температуры окружающей среды от номинальной не учитываются; изменение вязкости демпфирующей жидкости от изменения температуры окружающей среды от нормальной не учитывается. Основная особенность разработанной конструкции инерционного включателя, отличающая его от инерционных приборов аналогичного назначения, – возможность срабатывания при ускорении в любом из двух осевых направлений. Переключение контактной системы из исходного состояния происходит при разблокировании и последующем развороте переключателя контактной системы. Разработанная конструкция инерционного включателя обеспечивает надежное сохранение исходного состояния контактной системы во всех условиях эксплуатации подвижных объектов, и надежное ее переключение при движении объекта применения в течение определенного времени (разгоне, торможении) с ускорением не менее некоторой (уставочной) величины. *Результаты и выводы.* Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного включателя, предназначенного для технических систем автономных подвижных объектов.

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

**Для цитирования:** Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 71–79. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-8

## MATHEMATICAL MODEL OF THE INERTIA SWITCH

V.N. Kitaev<sup>1</sup>, R.L. Afanasyev<sup>2</sup>, M.V. Petrov<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia  
<sup>1, 2, 3</sup> kb2@vniitf.ru

**Abstract.** *Background.* The inertia switches are traditionally used in mobile vehicles for commutating the electric circuits of the engineering systems. Triggering of such devices takes place mainly when having taken integral along linear acceleration while the vehicle's space motion. To integrate the linear acceleration, both magnetic induction and hydraulic dampers are customary used. In a number of cases the hydraulic dampers, simplifying design of inertia switchers, are preferred. Given work presents the results of development of the inertia switch design, its mathematical model: differential equations, describing motion of mobile design elements, and the initial motion conditions, as well. For differential equating as follows assumptions are taken: the liquid is incompressible; no account to inertia switch components variation in dimension due to environmental variation in temperature; no account to dumping liquid viscosity variation due to environmental temperature variation. *Materials and methods.* The major feature of inertia

switch designed to distinguish it from similar inertia devices is its feasible actuation at acceleration along either of the two axial directions. The contact system switches from the initial state at releasing and following turning of the jumper strap. Design of the inertia switch enables reliable retention of the initial state of a contact system at any operation conditions of the mobile vehicles as well as fail-safe switching while vehicle motion during specified period of time (speedup, braking) with acceleration of no less than certain (specified) value. Presented results demonstrate possibility of development of the reliable and technologically effective inertia switch, designed for engineering systems of the independent mobile vehicles.

**Keywords:** inertia switch, hydraulic damper, inertial body, contact system, mathematical model, differential equations

**For citation:** Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of the inertia switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(2):71–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-8

**Актуальность разработки инерционного выключателя**

Для оптимального построения технических систем подвижных объектов потребовалась разработка инерционного выключателя, срабатывающего при наличии ускорения в любом из двух осевых направлений.

Применение двух инерционных выключателей, установленных с взаимно противоположным расположением осей чувствительности, в малогабаритном объекте не представилось возможным.

Инерционный выключатель должен с требуемым показателем надежности срабатывать – переключать контактную систему в составе объекта применения при его движении в течение определенного времени (разгоне, торможении) с ускорением не менее некоторой (уставочной) величины. Вместе с тем инерционный выключатель должен сохранять исходное состояние контактной системы при ударных ускорениях, на несколько порядков превышающих уставочное значение ускорения и вибрации в широком диапазоне частот.

В ходе выполнения разработки на основании имеющегося научно-технического задела [1–4] было создано техническое решение инерционного выключателя с инерционным демпфированием инерционного тела, обеспечивающего выполнение предъявленных к нему требований, соответствующих условию «изобретательский уровень» [5].

**Конструкция инерционного выключателя**

Конструкция инерционного выключателя иллюстрируется рис. 1–9.

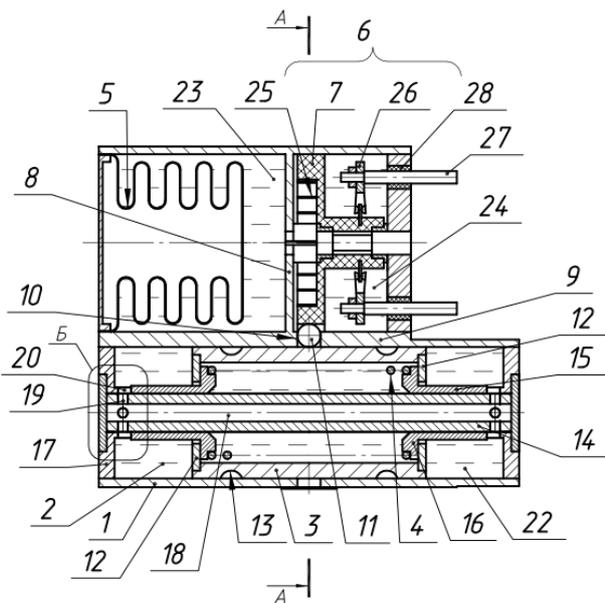


Рис. 1. Инерционный выключатель в исходном состоянии

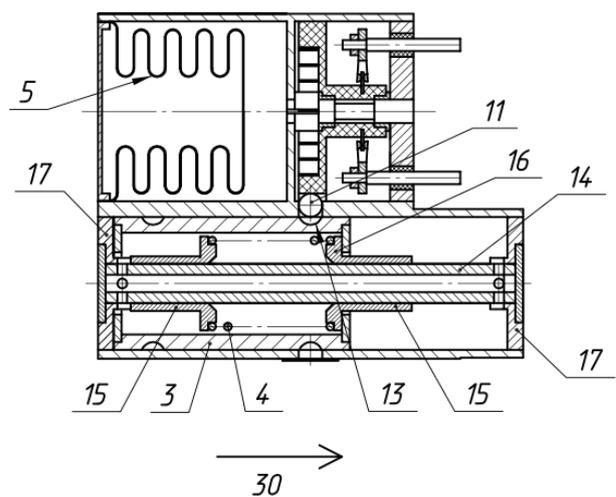


Рис. 2. Инерционное тело, перемещенное в одном из осевых направлений

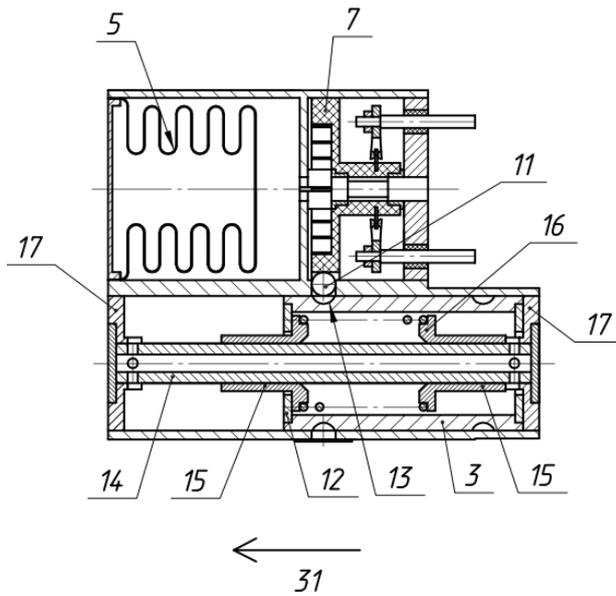


Рис. 3. Инерционное тело переместилось в противоположном осевом направлении

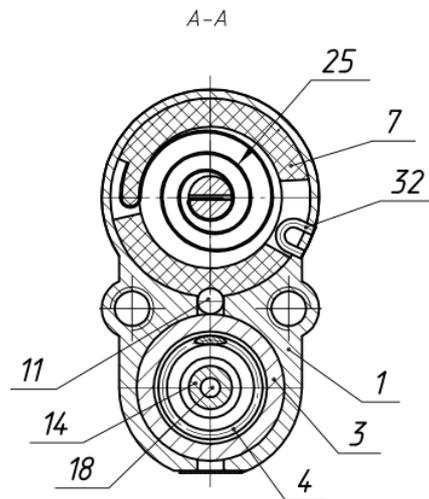


Рис. 4. Блокировка переключателя шариком

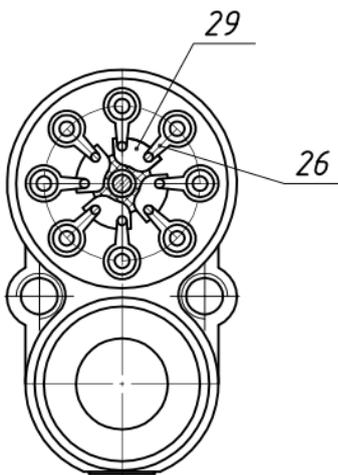


Рис. 5. Конструкция контактной системы

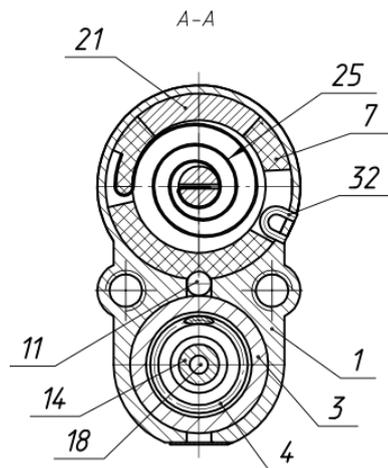


Рис. 6. Конструкции переключателя с постоянным магнитом

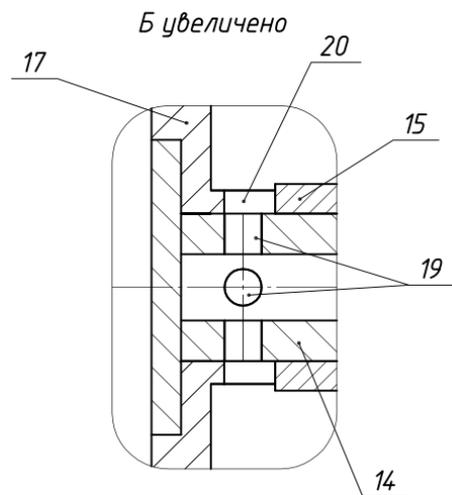


Рис. 7. Конструкция радиальных каналов

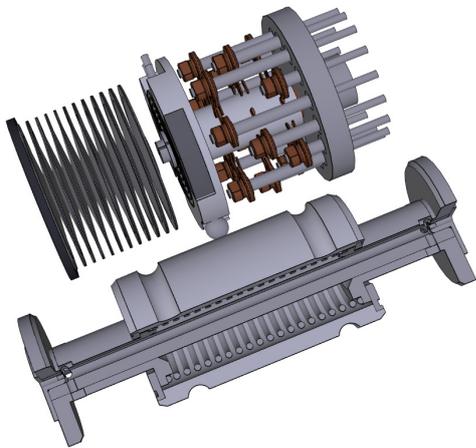


Рис. 8. 3D-модель инерционного включателя, корпус не показан

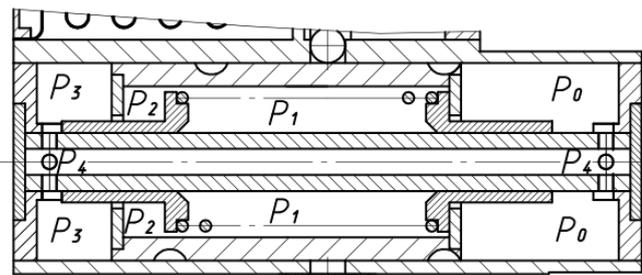


Рис. 9. Давления жидкости в объемах прибора при его срабатывании

Демпфирующая жидкость на рис. 2–9 не показана.

Инерционный включатель выполнен следующим образом. В герметичном корпусе 1 (рис. 1, 4, 5), заполненном демпфирующей диэлектрической жидкостью 2, в разделенных перегородками 8, 9 полостях 22, 23, 24 размещены инерционный груз 3 с рабочей пружиной 4, термокомпенсатор 5 и контактная система 6 с поворотным переключателем 7. Объемы 23 с термокомпенсатором и с контактной системой сообщаются через сквозной канал (не показано) в перегородке 8. Переключатель 7 поджат пружиной кручения 25 и заблокирован от проворота фиксатором в виде шарика 11, контактирующим с инерционным грузом 3 и установленным в цилиндрическом отверстии 10 в перегородке 9 между полостями 22, 24 корпуса 1. Инерционный груз 3 выполнен в виде полого цилиндра 3 с закрепленными по торцам шайбами 12 и с двумя кольцевыми канавками 13 на внешней цилиндрической поверхности для захода блокирующего поворот переключателя 7 шарика 11.

Внутри инерционного груза 3 размещен шток 14, на котором с возможностью осевого перемещения установлены две втулки 15. Каждая втулка 15 имеет наружный торцевой буртик 16. Втулки 15 помещены буртиками 16 в полость инерционного груза 3 между шайбами 12 и ориентированы буртиками 16 навстречу друг другу. Втулки 15 отжаты пружиной 4 в противоположные стороны до упора буртиками 16 в шайбы 12, закрепленные на инерционном грузе 3, а внешними торцами – в корпусные крышки 17. В штоке 14 выполнен сквозной продольный канал 18, сообщающийся в торцевых зонах с внутренним объемом корпуса 1 через выполненные в стенке штока 14 радиальные каналы 19. Радиальные каналы 19 совмещены с выполненными на внутренних торцах корпусных крышек 17 ответными пазами 20, в которые установлен шток 14. Количество радиальных каналов (отверстий) 19 равно количеству пазов 20.

Конструкция инерционного груза 3 в виде полого цилиндра с шайбами 12 и с предложенным соосным расположением втулок 15 и пружины 4 внутри инерционного груза 3, в совокупности выполняющих функции инерционного чувствительного элемента, обеспечивает «двунаправленность» срабатывания инерционного включателя с использованием одного инерционного груза 3 и одной рабочей пружины 4. Обеспечивается одинаковая чувствительность инерционного включателя в обоих осевых направлениях, а также достигается компактность всего прибора по высоте.

Контактная система 6 состоит из упругих контактов 26, установленных на токовыводах 27 со стеклоизоляторами 28. Поворотный переключатель 7 с ножами 29, поворачиваемый спиральной пружиной 25, обеспечивает переключение контактной системы 6. В исходном состоянии контактной системы 6 переключатель 7 заблокирован шариком 11, перемещение которого ограничено внешней цилиндрической поверхностью инерционного груза 3. Ограничитель угла поворота 32 переключателя 7 обеспечивает требуемое взаимное расположение ножей 29 относительно соответствующих упругих контактов 26 в переключенном состоянии контактной системы 6.

Термокомпенсатор в виде сильфона 5 компенсирует температурные изменения объема жидкости 2 в требуемом диапазоне температур внешней среды.

Выполнение в штоке 14 сквозного продольного канала 18, сообщающегося в торцевых зонах с внутренним объемом прибора через выполненные в стенке штока 14 радиальные каналы в виде отверстий 19 и совмещение радиальных каналов 19 с ответными пазами 20 на внутренних торцах, охватывающих шток 14 корпусных крышек 17, с возможностью разворота осевой направляющей 14, позволяет изменением проходного сечения радиальных каналов 19 регулировать гидравлическое сопротивление, следовательно, и расход демпфирующей жидкости 2 через организованные продольный 18 и радиальные 19 каналы при осевом перемещении инерционного груза 3, т.е. дает возможность настраивать интеграл по ускорению срабатывания инерционного включателя (рис. 1, 7). При этом регулировка осуществляется практически в полностью собранном приборе, т.е. значительно упрощается его сборка.

### Работа инерционного включателя

Инерционный включатель работает следующим образом. При наличии ускорения в направлении 30 (рис. 2) вдоль оси чувствительности с величиной, обеспечивающей превышение усилия предварительного поджатия пружины 4, инерционный груз 3 вместе с одной из втулок 15 начинает перемещаться, сжимая пружину 4. Демпфирующая жидкость 2 перетекает через радиальные зазоры между инерционным грузом 3 и корпусом 1, инерционным грузом 3 и буртиками 16 втулок 15, штоком 14 и втулками 15, а также через продольный канал 18 и радиальные каналы 19, отслеживая величиной расхода жидкости 2 значение линейного ускорения, т.е. ускорение интегрируется. Перемещение инерционного груза 3 ограничивается корпусной крышкой 17 (рис. 2, 3). Одна из кольцевых канавок 13

совмещается с шариком 11, который отжимается в нее переключателем 7, поворачиваемым спиральной пружиной кручения 25. Затем разблокированный переключатель 7 поворачивается спиральной пружиной 25 далее, переключая контактную систему 6. Ограничитель угла поворота 32 переключателя 7 обеспечивает требуемое взаимное расположение ножей 29 относительно соответствующих упругих контактов 26, при котором соответствующие ножи 29 переключателя 7 заходят в зоны контактирования упругих контактов 26. Переключенное состояние контактной системы 6 сохраняется поджатием переключателя 7 к ограничителю поворота 32 спиральной пружиной кручения 25.

При наличии ускорения в осевом направлении 31 (рис. 3) инерционный груз 3 вместе с соответствующей втулкой 15 смещается в противоположном направлении, совмещая другую кольцевую канавку 13 с шариком 11. В остальном работа инерционного выключателя аналогична приведенному ранее.

При необходимости взведения инерционного выключателя в процессе изготовления и приемки во фланце переключателя 7 закрепляется постоянный магнит 21 (рис. 6). Приспособлением с постоянным магнитом (на чертежах не показано) переключатель 7 посредством взаимодействия магнитов поворачивается и автоматически блокируется шариком 10, который отжимается из соответствующей кольцевой канавки 13 при возврате инерционного груза 3 в исходное положение пружиной 4. Для обеспечения взведения инерционного выключателя корпус 1 выполняется из немагнитного металла, например, стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-2014 или сплава 36НХТЮ ГОСТ 10994-74. Возможность многократного срабатывания и взведения инерционного выключателя обеспечивает достоверное подтверждение качества его изготовления, следовательно, и надежности в течение последующего срока эксплуатации.

Обеспечение расходом жидкости 2 через организованные в конструкции инерционного выключателя радиальные зазоры и каналы интегрирования линейного ускорения в направлении срабатывания исключает срабатывание прибора от кратковременных ускорений.

Более подробно с конструкцией и работой инерционного выключателя можно ознакомиться по описанию изобретения [5].

### Математическая модель инерционного выключателя

Введем прямоугольную правую систему координат  $OXYZ$ , связанную с инерционным выключателем. Начало системы координат – в центре инерционного груза 3 при его начальном положении. Направления осей показаны на рис. 1.

Введем базовую точку в центре инерционного груза 3 и обозначим ее абсциссу через  $X_{пз}$ . Диапазон изменения  $X_{пз} - [X_1, X_2]$  ( $X_1 < 0, X_2 > 0$ ).

При составлении дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения:

- жидкость считаем несжимаемой;
- изменения размеров деталей инерционного выключателя при изменении температуры окружающей среды (от нормальной  $T_{ж} = 20$  °С) не учитываются;
- изменение вязкости демпфирующей жидкости при изменении температуры окружающей среды (от нормальной  $T_{ж} = 20$  °С) не учитывается.

Силы, действующие на подвижные части инерционного выключателя – инерционный груз 3, шайбы 12, одну из втулок 15, пружину 4, рассмотрены ниже.

Сила инерции, действующая на подвижные части  $\vec{F}_{ин}$ , определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{ин} = -m_{пр} \vec{a}_{ив}, \quad (1)$$

где  $m_{пр}$  – приведенная масса подвижных частей;  $\vec{a}_{ив}$  – ускорение в месте расположения центра масс подвижных частей:

$$\vec{a}_{ив} = (a_{ив\_x}; a_{ив\_y}; a_{ив\_z}), \quad (2)$$

где  $a_{ив\_x}$ ,  $a_{ив\_y}$ ,  $a_{ив\_z}$  – проекции  $\vec{a}_{ив}$  на оси системы координат  $OXYZ$ .

Приведенная (суммарная) масса подвижных частей инерционного чувствительного элемента прибора определяется по формуле

$$m_{пр} = m_{иг} + 2m_{шб} + m_{вт} + \frac{m_{пр}}{3}, \quad (3)$$

где  $m_{иг}$ ,  $m_{шб}$ ,  $m_{вт}$ ,  $m_{пр}$  – масса инерционного груза 3, шайбы 12, втулки 15, пружины 4 соответственно.

Сила Архимеда, действующая на подвижные части  $\vec{F}_A$ , определяется следующим образом:

$$\vec{F}_A = m_{\text{пр\_ж}} (\vec{a}_{\text{ив}} - \vec{g}), \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $m_{\text{пр\_ж}}$  – приведенная масса жидкости, вытесненной подвижными частями:

$$m_{\text{пр\_ж}} = \rho_{\text{ж}} V_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;  $V_{\text{пр}}$  – приведенный объем подвижных частей:

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{иг}} + 2V_{\text{шб}} + V_{\text{вт}} + V_{\text{пр}}, \quad (6)$$

где  $V_{\text{иг}}$ ,  $V_{\text{шб}}$ ,  $V_{\text{вт}}$ ,  $V_{\text{пр}}$  – объем инерционного груза 3, шайбы 12, втулки 15, пружины 4 соответственно.

Величина силы упругости пружины 4  $F_{\text{пр}}$  определяется следующим образом:

$$F_{\text{пр}} = -\text{sign}(X_{\text{пз}})[F_{\text{пр}_0} + C_{\text{пр}} X_{\text{пз}}], \quad (7)$$

где  $\text{sign}(X_{\text{пз}}) = \begin{cases} 1 & \text{при } X_{\text{пз}} > 0 \\ 0 & \text{при } X_{\text{пз}} = 0 \\ -1 & \text{при } X_{\text{пз}} < 0 \end{cases}$ ;  $F_{\text{пр}_0}$  – начальное усилие пружины 4;  $C_{\text{пр}}$  – коэффициент упругости пружины 4 (жесткость).

Касательная составляющая реакции ( $F_{\text{тр}}$ , – сила трения), действующей на инерционный груз 3 со стороны шарика 11 контактной системы 6 определяется следующим образом:

$$F_{\text{тр}} \leq \mu_{\text{тр}} N_{\text{шр}}, \quad (8)$$

где  $\mu_{\text{тр}}$  – коэффициент трения;  $N_{\text{шр}}$  – нормальная составляющая реакции, действующей со стороны шарика 11 на инерционное тело 3.

Сила гидравлического сопротивления  $\vec{F}_{\text{гс}}$  зависит от разности давлений  $\Delta p$  во внутренних полостях инерционного включателя (см. рис. 9) и определяется следующим образом:

$$F_{\text{гс}} = \sum_{i=1}^{i=6} p_i S_i, \quad (9)$$

где  $p_i$  – давление в области с номером  $i$ ;  $S_i$  – алгебраическая сумма площадей, на которые оказывается давление  $p_i$  (каждому слагаемому приписывается знак «+» или «-» в зависимости от направления действия давления).

Перепад давления жидкости во внутренних полостях инерционного включателя будем определять из следующих соображений.

При перемещении подвижного элемента с площадью поверхности  $S_{\text{пз}}$  на величину  $\Delta X_{\text{пз}}$  происходит вытеснение жидкости объемом  $\Delta V$ :

$$\Delta V = S_{\text{пз}} \Delta X_{\text{пз}}. \quad (10)$$

Вытесненная жидкость протекает за промежуток времени  $\Delta t$  через зазоры и отверстия. С другой стороны, имеем

$$\Delta V = Q \Delta t, \quad (11)$$

где  $Q$  – суммарный расход жидкости через зазоры и отверстия.

Из выражений (10) и (11), получаем следующее соотношение:

$$\frac{\Delta X_{\text{пз}}}{\Delta t} = \frac{Q}{S_{\text{пз}}}. \quad (12)$$

После предельного перехода в (12) при  $\Delta t \rightarrow 0$  с учетом того, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X_{пз}}{\Delta t} = \left| \dot{X}_{пз} \right|, \quad (13)$$

имеем следующее соотношение для определения величины суммарного расхода жидкости:

$$Q = \left| \dot{X}_{пз} \right| S_{пз}, \quad (14)$$

где  $\dot{X}_{пз}$  – первая производная по времени абсциссы подвижного элемента.

С другой стороны, суммарный расход  $Q$  жидкости, перетекающей при движении подвижного элемента из полости  $P_3$  в полости  $P_0, P_2, P_4$  (см. рис. 9), можно определить следующим образом:

$$Q = Q_{30} + Q_{32} + Q_{34}, \quad (15)$$

где  $Q_{30}$  – расход жидкости через кольцевой зазор между корпусом  $I$  и инерционным грузом  $3$ ;  $Q_{32}$  – расход жидкости через кольцевой зазор между шайбой  $12$  и втулкой  $15$ ;  $Q_{34}$  – расход жидкости через четыре отверстия в штоке  $14$ .

Расходы жидкости через зазоры и отверстия будем определять следующим образом [1]:

$$Q_{30} = \frac{S_{кр\_гр} \delta_{кр\_гр}^2}{12\eta_{ж} K L_{кр\_гр}} (P_3 - P_0) + \frac{S_{кр\_гр}}{2} \left| \dot{X}_{пз} \right|, \quad (16)$$

где  $S_{кр\_гр}$  – площадь зазора между корпусом  $I$  и инерционным грузом  $3$ ;  $\delta_{кр\_гр}$  – величина зазора между корпусом  $I$  и инерционным грузом  $3$ ;  $\eta_{ж}$  – коэффициент динамической вязкости жидкости;  $K$  – коэффициент несоосности,  $K = 0,4 \div 1$ ;  $L_{кр\_гр}$  – длина зазора между корпусом  $I$  и инерционным грузом  $3$  в направлении движения жидкости;  $P_3, P_0$  – давления в соответствующих полостях инерционного включателя (см. рис. 9):

$$Q_{32} = \frac{S_{шб\_шт} \delta_{шб\_шт}^2}{12\eta_{ж} K L_{шб\_шт}} (P_3 - P_2) + \frac{S_{шб\_шт}}{2} \left| \dot{X}_{пз} \right|, \quad (17)$$

где  $S_{шб\_шт}$  – площадь зазора между шайбой  $12$  и штоком  $14$ ;  $\delta_{шб\_шт}$  – величина зазора между шайбой  $12$  и штоком  $14$ ;  $L_{шб\_шт}$  – длина зазора между шайбой  $12$  и штоком  $14$  в направлении движения жидкости;  $P_3, P_2$  – давления в соответствующих полостях инерционного включателя (см. рис. 9):

$$Q_{34} = 4\mu S_{отв} \sqrt{\frac{2(P_3 - P_4)}{\rho_{ж}}}, \quad (18)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода;  $S_{отв}$  – площадь отверстия в штоке  $14$ ;  $P_3, P_4$  – давления в соответствующих полостях инерционного включателя (см. рис. 9).

Аналогичным образом определяются разности давлений при протекании жидкости через остальные области инерционного включателя.

Таким образом, имеем систему уравнений, связывающую  $P_i, S_i, Q_i$ . Эту систему уравнений можно рассматривать как неявное соотношение для проекции силы гидравлического сопротивления  $\vec{F}_{гс}$  на ось абсцисс:

$$\Phi(F_{гс}, \dot{X}_{пз}, P_1, P_2, P_3, P_4, P_0) = 0. \quad (19)$$

Явного выражения для  $F_{гс}$  не было получено – значение этой силы рассчитывается путем численного решения (19) на каждом временном шаге.

Уравнения движения инерционного тела запишем в следующем виде:

$$m_{пз} \ddot{X}_{пз} = \left( \vec{F}_{ин} + \vec{F}_A + \vec{F}_{пз} + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_{гс} \right)_x, \quad (20)$$

где  $\ddot{X}_{пз}$  – вторая производная по времени  $X_{пз}$ ;  $\left( \vec{F}_{ин} + \vec{F}_A + \vec{F}_{пз} + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_{гс} \right)_x$  – проекция на ось  $OX$  суммы сил, действующих на инерционное тело.

Уравнение (20) решается численно при начальных условиях:  $t = 0$  с,  $X_{пз} = 0$  м,  $X_1 = X_{\min}$ ,  $X_2 = X_{\max}$  и заданной зависимости ускорения инерционного включателя от времени.

Использование описанной математической модели позволяет определить режимы, при которых срабатывает инерционный включатель, а также подобрать конструктивные параметры, обеспечивающие его срабатывание при требуемых режимах.

### Заключение

Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного включателя, предназначенного для технических систем автономных подвижных объектов.

### Список литературы

1. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Инерционный включатель с гидравлическим демпфированием инерционного тела // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 88–97. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10
2. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель порогового инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 30–40.
3. Пат. РФ 2778658, МПК H01 H 35/14. Инерционный включатель / Китаев В. Н. № 2022108834 ; заявл. 01.04.2022 ; зарег. 22.08.2022.
4. Пат. РФ 2784377, МПК H01 H 35/14. Инерционный включатель / Китаев В. Н. № 2022124603 ; заявл. 19.09.2022 ; зарег. 24.11.2022.
5. Пат. РФ 2824656, МПК H01 H 35/14. Инерционный включатель / Китаев В. Н., Тенетилов Г. В. № 2024103939 ; заявл. 16.02.2024 ; зарег. 12.08.2024.
6. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика : справ. пособие. М. : Машиностроение, 1971.

### References

1. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Inertial switch with hydraulic damping of an inertial body. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):88–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10
2. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of a threshold inertial switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):30–40. (In Russ.)
3. Patent RF 2778658, MPK H01 H 35/14. *Inertsionnyy vklyuchatel' = Inertial switch*. Kitaev V.N. № 2022; appl. 01.04.2022; reg. 22.08.2022. (In Russ.)
4. Patent RF 2784377, MPK H01 H 35/14. *Inertsionnyy vklyuchatel' = Inertial switch*. Kitaev V.N. № 2022; appl. 19.09.2022; reg. 24.11.2022. (In Russ.)
5. Patent RF 2824656, MPK H01 H 35/14. *Inertsionnyy vklyuchatel' = Inertial switch*. Kitaev V.N., Tenetilov G.V. № 2024103939; appl. 16.02.2024; reg. 12.08.2024. (In Russ.)
6. Bashta T.M. *Mashinostroitel'naya gidravlika. Spravochnoe posobie = Machine-building hydraulics : a reference manual*. Moscow: Mashinostroenie, 1971. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Владимир Николаевич Китаев

начальник конструкторского отдела,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb@vniitf.ru

#### Роман Львович Афанасьев

заместитель начальника отдела,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

#### Vladimir N. Kitaev

Head of the design department,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

#### Roman L. Afanasyev

Deputy head of department,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

**Максим Владимирович Петров**

инженер,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

**Maksim V. Petrov**

Engineer,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 01.05.2025**

## СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТАНТ ПОЛИМЕРНО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Е. Д. Карташова<sup>1</sup>, А. Ю. Муйземнек<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup> katrina89@yandex.ru, <sup>2</sup> muyzemnek@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Отличительной чертой полимерных слоистых композиционных материалов является анизотропия механических свойств всего материала и каждого его слоя. *Материалы и методы.* Это приводит к усложнению процесса проектирования, которое обусловлено необходимостью определения эффективных упругих характеристик полимерного слоистого композиционного материала с учетом его структуры. Целью работы является оценка существующих методов вычисления эффективных упругих характеристик полимерно-металлических композитов на основе матрицы из нейлона и армирующего из нержавеющей стали путем сравнения результатов расчета, полученных различными методами. *Результаты.* В результате исследования установлено, что все инженерные константы согласованы и дальнейшее измельчение сетки не имеет смысла. *Выводы.* Коэффициент Пуассона, полученный на сетки, положителен в то время, как значения, полученные другими методами, отрицательны. Это позволяет сделать вывод о том, что используемая сетка недостаточно подробна.

**Ключевые слова:** полимерно-металлический композиционный материал, нейлон, нержавеющая сталь, эффективные характеристики упругих свойств, модели и методы экспериментальных исследований и расчета

**Для цитирования:** Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Сопоставление результатов расчета инженерных констант полимерно-металлических композитов, полученных различными методами // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 80–88. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-9

## COMPARISON OF THE RESULTS OF CALCULATION OF ENGINEERING CONSTANTS OF POLYMER-METALLIC COMPOSITES OBTAINED BY VARIOUS METHODS

E.D. Kartashova<sup>1</sup>, A.Yu. Muizemnek<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup> katrina89@yandex.ru, <sup>2</sup> muyzemnek@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* Distinctive features of polymer layered composite materials are the anisotropy of the mechanical properties of the entire material and each of its layers. *Materials and methods.* This leads to a complication of the design process, which is due to the need to determine the effective elastic characteristics of the polymer layered composite material, taking into account its structure. The aim of the work is to evaluate the existing methods for calculating the effective elastic properties of polymer-metal composites based on a nylon matrix and stainless steel reinforcement by comparing the calculation results obtained by different methods. *Results.* The study found that all engineering constants are consistent and further mesh refinement does not make sense. *Conclusions.* Poisson's ratio obtained on the mesh is positive, while the values obtained by other methods are negative. This allows us to conclude that the mesh used is not detailed enough.

**Keywords:** polymer-metal composite material, nylon, stainless steel, effective characteristics of elastic properties, models and methods of experimental research and calculation

**For citation:** Kartashova E.D., Muizemnek A.Yu. Comparison of the results of calculation of engineering constants of polymer-metallic composites obtained by various methods. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):80–88. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-9

Отличительной чертой полимерных слоистых композиционных материалов является анизотропия механических свойств всего материала и каждого его слоя. При этом упругие свойства и прочность материала различны по толщине детали. Все это приводит к усложнению процесса проектирования, которое обусловлено необходимостью определения эффективных упругих характеристик полимерного слоистого композиционного материала с учетом его структуры. Целью работы является оценка существующих методов вычисления эффективных упругих характеристик полимерно-металлических композитов на основе матрицы из нейлона и армирующего из нержавеющей стали путем сравнения результатов расчета, полученных различными методами. Такая оценка позволит более обоснованно осуществлять выбор вычислительных методов при реализации образовательных программ по различным специальностям и направлениям подготовки в вузах [1, 2].

Примером применения полимерно-металлического слоистого композиционного материала являются широко распространенные в медицине трубки различного диаметра, которые состоят из полимерной матрицы и металлической ткани в качестве армирующей основы. Репрезентативная ячейка (*RVE – representative volume element*) такого композиционного материала и ее характерные размеры показаны на рис. 1.

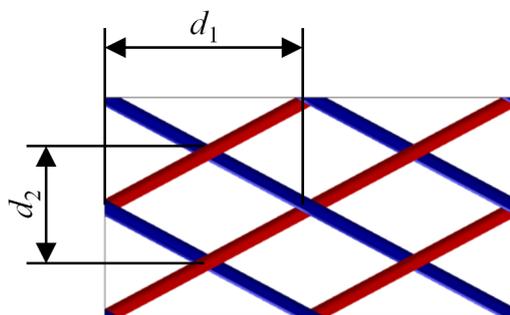


Рис. 1. Репрезентативная ячейка полимерно-металлического слоистого композиционного материала (матрица не показана), характерные размеры

В качестве примера рассмотрим трубку из композиционного материала, репрезентативная ячейка которой имеет следующие размеры:

- наружный диаметр  $d_H = 1,95$  мм;
- внутренний диаметр  $d_{BH} = 1,14$  мм;
- материал матрицы – нейлон;
- материал армирующего – нержавеющая сталь;
- характерный размер оплетки  $d_1 = 1,148$  мм;
- характерный размер оплетки  $d_2 = 0,617$  мм;
- площадь поперечного сечения нити оплетки  $S = 0,004$  мм<sup>2</sup>.

Рассматриваемые полимерно-металлические слоистые композиционные материалы являются ортотропными материалами. Эффективные матрицы жесткости и податливости ортотропного материала определяются девятью независимыми инженерными константами: модулями Юнга  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  и  $E_{33}$ , модулями сдвига  $G_{12}$ ,  $G_{23}$  и  $G_{13}$  и коэффициентами Пуассона  $\nu_{21}$ ,  $\nu_{31}$ ,  $\nu_{32}$ . Матрица податливости  $[S]$  ортотропного материала представляется следующим образом [3]:

$$[S] = \begin{bmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & -\nu_{31}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & -\nu_{32}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_{11} & -\nu_{23}/E_{22} & 1/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

На инженерные константы, входящие в выражение (1), наложены следующие ограничения:

- условие симметрии  $\frac{\nu_{ij}}{E_{ii}} = \frac{\nu_{ji}}{E_{jj}}$  (без суммирования);

– ограничения в виде неравенств

$$E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{23}, G_{13} > 0; |v_{12}| < \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\frac{1}{2}}; |v_{13}| < \left(\frac{E_1}{E_3}\right)^{\frac{1}{2}}; |v_{23}| < \left(\frac{E_2}{E_3}\right)^{\frac{1}{2}};$$

$$1 - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32} - v_{13}v_{31} - 2v_{21}v_{32}v_{13} > 0. \quad (2)$$

Тканый слой из нержавеющей стали в композиционном материале имеет плетение «braided». Поэтому система координат, в которой будут определяться инженерные константы, выбрана таким образом, что первая материальная ось располагается вдоль большей диагонали ромба (см. рис. 1), вторая – вдоль меньшей.

Для описания деформационного поведения нержавеющей стали и нейлона использована изотропная упругая модель. Характеристики физико-механических свойств нержавеющей стали и нейлона, которые использовались в изотропных упругих моделях, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики физико-механических свойств компонентов

Наименование характеристики	Наименование материала	
	Нейлон	Нержавеющая сталь
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1	7,8
Модуль упругости, ГПа	0,252	210
Коэффициент Пуассона	0,37	0,3

### Методы расчета инженерных констант (методы гомогенизации)

Считается, что простые двухфазные композиты состоят из матрицы, которая армирована рядом включений (I). Используем индексы «0» для матрицы и «1» для фазы включений. Объемные доли двух фаз таковы, что  $v_0 + v_1 = 1$ .

Осредненные по объему поля деформаций в RVE, в матричной фазе и фазе включения связаны выражением

$$\langle \varepsilon \rangle_\omega = v_0 \langle \varepsilon \rangle_{\omega_0} + v_1 \langle \varepsilon \rangle_{\omega_1}. \quad (3)$$

Любая из рассматриваемых моделей гомогенизации среднего поля (MFH – Mean-field homogenization) может быть определена с помощью так называемых тензоров концентрации деформаций. Они входят в выражение

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega_1} = \mathbf{B}^\varepsilon : \langle \varepsilon \rangle_{\omega_0}, \quad \langle \varepsilon \rangle_{\omega_1} = \mathbf{A}^\varepsilon : \langle \varepsilon \rangle_\omega. \quad (4)$$

Средняя по объему деформация, вычисленная по всем включениям, связана со средней по объему деформацией, вычисленной по матричной фазе, через первый тензор, а со средней по объему деформацией, вычисленной по всему RVE (макродеформацией), через второй тензор. Два тензора концентрации деформаций не являются независимыми. Действительно, второй можно вычислить, зная первый.

Эти результаты действительны для любой модели материала для любой фазы

$$\mathbf{A}^\varepsilon = \mathbf{B}^\varepsilon : \left[ v_1 \mathbf{B}^\varepsilon + (1 - v_1) \mathbf{I} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Эти выражения справедливы для всех материалов имеющихся фаз.

Далее рассмотрим двухфазные линейно-упругие композиты. Для любой модели гомогенизации, определяемой тензором концентрации деформации, макрожесткость вычисляется с помощью выражения

$$\bar{\mathbf{C}} = \left[ v_1 \mathbf{C}_1 : \mathbf{B}^\varepsilon + (1 - v_1) \mathbf{C}_0 \right] : \left[ v_1 : \mathbf{B}^\varepsilon + (1 - v_1) \mathbf{I} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Используя решение Эшелби [4], задачу определения тензоров концентрации деформации можно решить аналитически. Установлено, что деформация внутри включения (I) однородна и связана с удаленной деформацией следующим образом:

$$\varepsilon(\mathbf{x}) = \mathbf{H}^e(\mathbf{I}, \mathbf{C}_0, \mathbf{C}_1) : \mathbf{E}^*, \forall \mathbf{x} \in (\mathbf{I}), \quad (7)$$

где  $\mathbf{H}^e(\mathbf{I}, \mathbf{C}_0, \mathbf{C}_1)$  – тензор концентрации деформаций единичного включения, определяемый следующим образом:

$$\mathbf{H}^e(\mathbf{I}, \mathbf{C}_0, \mathbf{C}_1) = \{ \mathbf{I} + \zeta(\mathbf{I}, \mathbf{C}_0, \mathbf{C}_1) : \mathbf{C}_0^{-1} : (\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_0) \}^{-1}. \quad (8)$$

Другой тензор, который играет важную роль – это тензор Хилла (тензор поляризации), определяемый как

$$\mathbf{P}^e(\mathbf{I}, \mathbf{C}_0) = \zeta(\mathbf{I}, \mathbf{C}_0) : \mathbf{C}_0^{-1}. \quad (9)$$

Решение задачи об единственном включении является основой изложенных далее MFH-моделей.

Рассмотрим случай композитного материала, состоящего из матричной фазы с жесткостью  $\mathbf{C}_0$ , усиленной несколькими включениями с одинаковой жесткостью  $\mathbf{C}_1$ , которые должны быть до сих пор идентичными с точки зрения материала, формы и ориентации. Линейные перемещения, соответствующие удаленной деформации  $\mathbf{E}$ , прикладываются на границе. В отличие от проблемы одного включения проблема множественного включения не имеет аналитического решения. Однако существует несколько моделей MFH, основанных на разных предположениях. Все они используют решение задачи одиночного включения.

*А. Модель Мори – Танака (M-T).* Эта модель была предложена Мори и Танакой (1973). Она основана на решении Эшелби. Установлено, что тензор концентрации напряжений, связывающий объемное среднее напряжение по всем включениям со средней деформацией матрицы, определяется следующим образом [5]:

$$\mathbf{V}^e = \mathbf{H}^e(\mathbf{I}, \mathbf{C}_0, \mathbf{C}_1). \quad (10)$$

Этот тензор в точности является тензором концентрации напряжений задачи об одиночном включении. Бенвенистом (1987) дана следующая интерпретация модели Мори – Танаки: каждое включение в реальном RVE ведет себя так, как если бы оно было изолировано в реальной матрице.

*Б. Модель двойного включения (DI).* Модель двойного включения была предложена Нематом, Насером и Хори (1993). Она основана на предположении, что каждое включение (I) жесткости  $\mathbf{C}_1$  окружено в его близком окружении действительным матричным материалом жесткости  $\mathbf{C}_0$ , а вне этих областей имеется эталонный носитель жесткости  $\mathbf{C}_r$ . Модели двойного включения может быть дана следующая интерпретация: реальный RVE ведет себя как композиционный материал, изготовленный из фиктивной эталонной матрицы жесткости  $\mathbf{C}_r$ , в котором находятся включения жесткости  $\mathbf{C}_1$ , покрытые материалом жесткости  $\mathbf{C}_0$ .

### Результаты расчета инженерных констант

Расчет инженерных констант выполнен методом Мори – Танака (M-T) и двойного включения (DI), с использованием базовой и улучшенной моделей нити, и методом спектральных элементов (FFT). Расчет напряженно-деформированного состояния RVE выполнен методом конечных элементов (FEM) и методом спектральных элементов (FFT). Некоторые результаты расчета напряженно-деформированного состояния RVE приведены на рис. 2 и 3. Результаты расчетов приведены для случая растяжения RVE вдоль оси X (рис. 2) на 3 %.

На рис. 2 показаны распределения приведенных по Мизесу напряжений, полученные методом конечных элементов (FEM) на конечно-элементной сетке  $100 \times 150 \times 50$  элементов, и методом спектральных элементов (FFT) на сетках  $100 \times 150 \times 50$ ,  $200 \times 300 \times 100$  и  $300 \times 450 \times 150$  элементов соответственно.

Результаты сопоставления распределений позволяют сделать следующие выводы:

– характер распределения приведенных по Мизесу напряжений на всех рисунках схож – напряжения в нитях армирующего больше, чем в матрице; в местах пересечения волокон армирующего наблюдается концентрация напряжений;

– при уменьшении размеров конечных элементов происходит увеличение максимальных напряжений в местах концентрации напряжений. Значения максимальных напряжений в местах концентрации напряжений, показанных на рис. 2, соответственно равны 4,57, 7,25, 13,3, 16,97 ГПа.

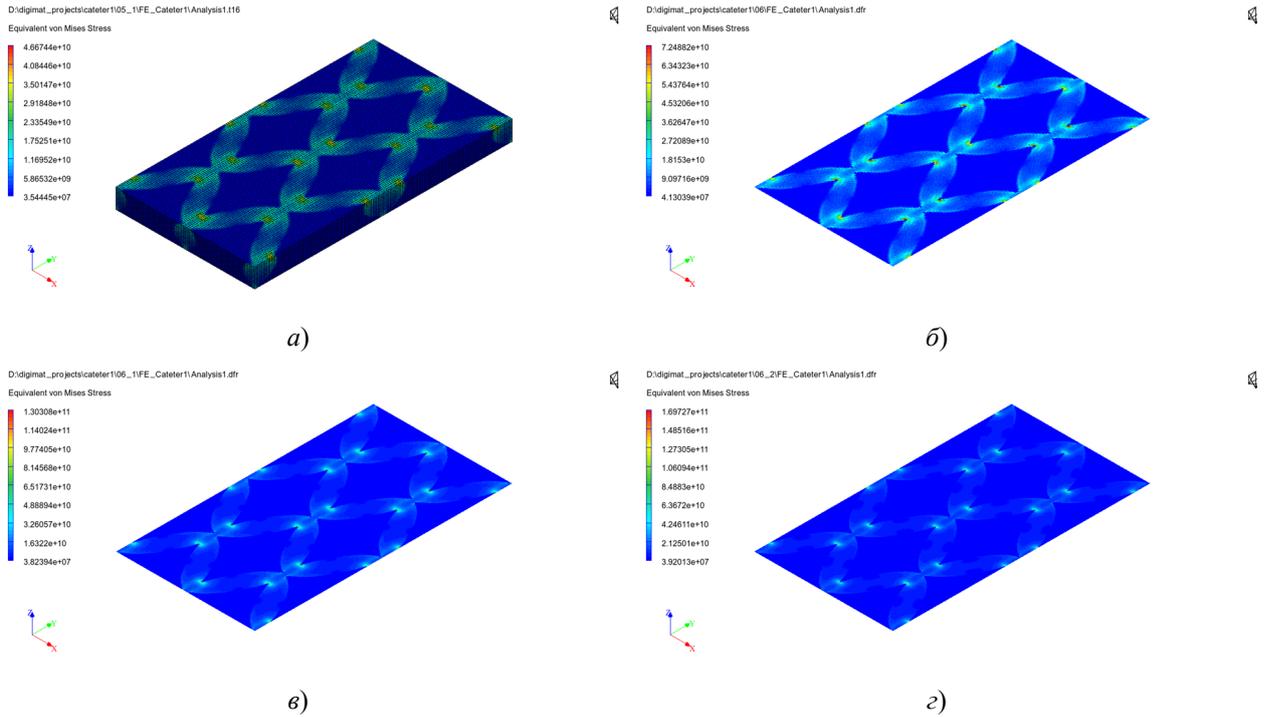


Рис. 2. Распределения приведенных по Мизесу напряжений в RVE (дин/см<sup>2</sup>):  
 а – FEM; б, в, з – FFT; размеры расчетной области 100×150×50 (а, б); 200×300×100 (в); 300×450×150 (з)

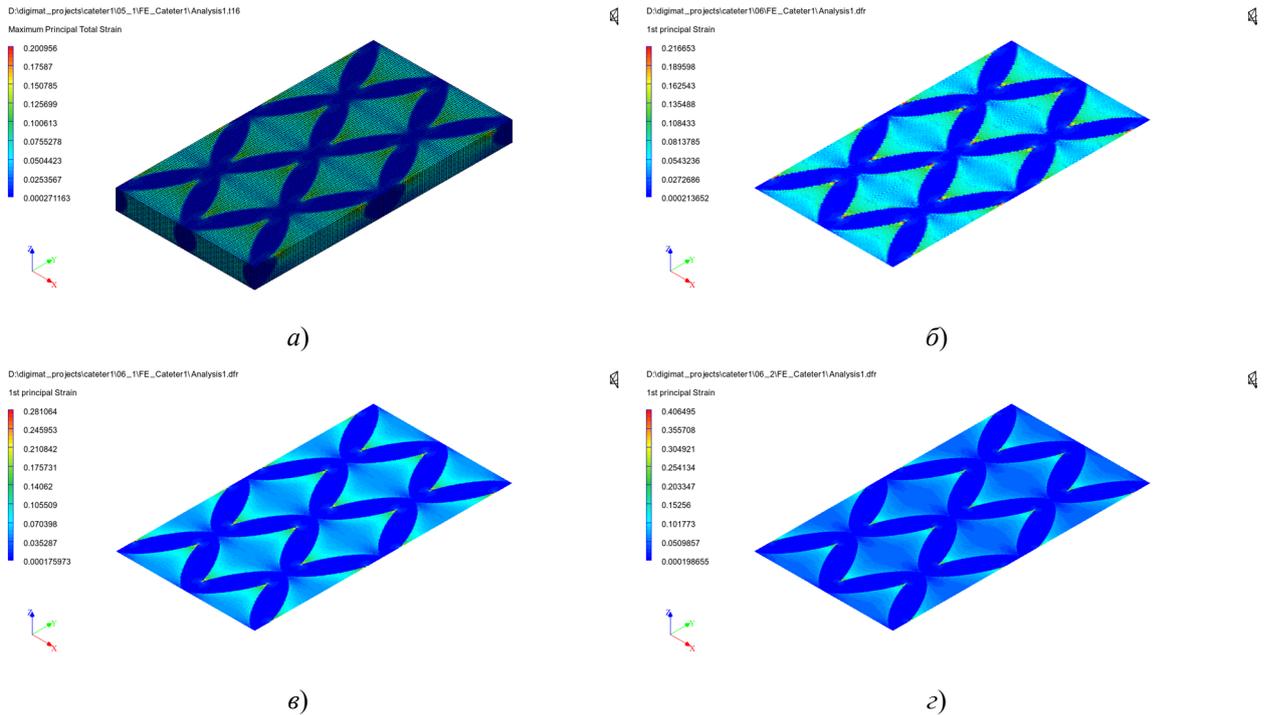


Рис. 3. Распределения первых главных деформаций в RVE:  
 а – FEM; б, в, з – FFT; размеры расчетной области 100×150×50 (а, б); 200×300×100 (в); 300×450×150 (з)

На рис. 3 показаны распределения первых главных деформаций, полученные методом конечных элементов (FEM) на конечно-элементной сетке 100×150×50 элементов и методом спектральных элементов (FFT) на сетках 100×150×50, 200×300×100 и 300×450×150 элементов, соответственно.

Результаты сопоставления распределений позволяют сделать следующие выводы:

– характер распределения первых главных деформаций на всех рисунках схож – первые главные деформации в матрице больше, чем в нитях армирующего; у пересечения волокон армирующего в матрице наблюдается концентрация деформаций;

– при уменьшении размеров конечных элементов происходит увеличение первых главных деформаций в местах концентрации деформаций. Значения первых главных деформаций в местах концентрации деформаций, показанных на рис. 3, соответственно равны 0,2, 0,217, 0,281, 0,406 ГПа.

Влияние размеров сетки на инженерные константы можно оценить по результатам их расчета на сетках различного размера. Результаты расчеты инженерных констант приведены в табл. 3 и 4. В табл. 4 приведены значения инженерных констант, полученных на сетках, имеющих 0,75, 6 и 20,25 млн ячеек соответственно.

Таблица 3

Инженерные константы композита, полученные различными методами

Инженерная константа	Базовая модель		Улучшенная модель нити		
	М-Т	DI	М-Т	DI	FFT
Модуль $E_1$ , ГПа	0,416	0,449	0,417	0,499	0,127
Модуль $E_2$ , ГПа	4,310	4,606	4,681	5,348	0,987
Модуль $E_3$ , ГПа	0,530	0,568	0,474	0,564	0,099
Коэффициент Пуассона $\nu_{12}$	0,290	0,290	0,245	0,246	0,286
Коэффициент Пуассона $\nu_{23}$	-1,117	-1,093	-0,107	-0,072	-0,367
Коэффициент Пуассона $\nu_{31}$	0,502	0,495	0,465	0,459	0,192
Модуль $G_{12}$ , ГПа	9,921	9,928	6,802	6,831	5,117
Модуль $G_{23}$ , ГПа	0,157	0,170	2,794	2,823	0,278
Модуль $G_{13}$ , ГПа	0,150	0,162	0,915	0,944	0,264

Таблица 4

Инженерные константы композита, полученные методом спектральных элементов на сетках различного размера

Инженерная константа	Размеры расчетной области		
	100×150×50	200×300×100	300×450×150
Модуль $E_1$ , ГПа	13,780	12,840	12,650
Модуль $E_2$ , ГПа	102,900	99,400	98,700
Модуль $E_3$ , ГПа	29,490	9,840	9,884
Коэффициент Пуассона $\nu_{12}$	0,287	0,286	0,286
Коэффициент Пуассона $\nu_{23}$	0,044	-0,362	-0,367
Коэффициент Пуассона $\nu_{31}$	0,200	0,187	0,192
Модуль $G_{12}$ , ГПа	51,480	51,200	51,172
Модуль $G_{23}$ , ГПа	10,000	2,786	2,778
Модуль $G_{13}$ , ГПа	5,800	2,644	2,640

### Результаты сопоставления инженерных констант, вычисленных различными методами

Сопоставляемые инженерные константы были рассчитаны методами Мори – Танака (М-Т) и двойного включения (DI), с использованием базовой и улучшенной моделей нити, и методом спектральных элементов (FFT). Полученные различными методами инженерные константы приведены в табл. 3, результаты сопоставления представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 используются следующие обозначения: Ряд1 – метод Мори – Танака, базовая модель нити; Ряд2 – метод двойного включения, базовая модель нити; Ряд3 – метод Мори – Танака, улучшенная модель нити; Ряд4 – метод двойного включения, улучшенная модель нити; Ряд5 – метод спектральных элементов.

В результате исследования установлено, что методы Мори – Танака и двойного включения дают согласованные результаты при вычислении модулей упругости  $E_{11}$ ,  $E_{33}$  и коэффициентов Пуассона  $\nu_{12}$  и  $\nu_{31}$ , результаты вычисления остальных характеристик упругости менее согласованы. Метод спектральных элементов дает заниженные значения модулей упругости  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $E_{33}$  и модулей сдвига  $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ,  $G_{13}$ .

Сопоставляемые инженерные константы были также рассчитаны методом спектральных элементов (FFT). Использовались сетки, имеющие размер 100×150×50, 200×300×100, 300×450×150 соответственно. Инженерные константы, полученные различными методами, приведены в табл. 4, результаты сопоставления представлены на рис. 4. Для сравнения в них приведены значения инженерных констант, полученных методами Мори – Танака и двойного включения с использованием улучшенной модели нити.

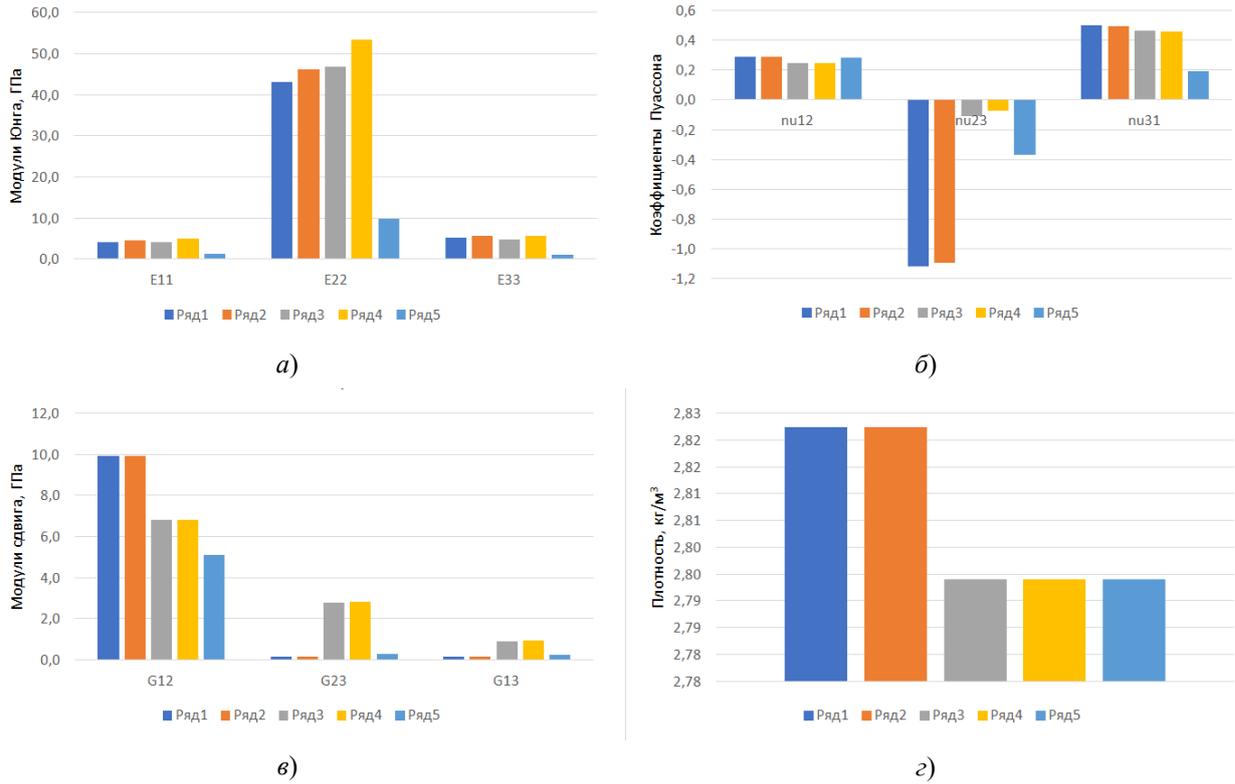


Рис. 4. Сопоставление результатов вычислений инженерных констант: *а* – модулей Юнга; *б* – коэффициентов Пуассона; *в* – модулей сдвига; *г* – плотности

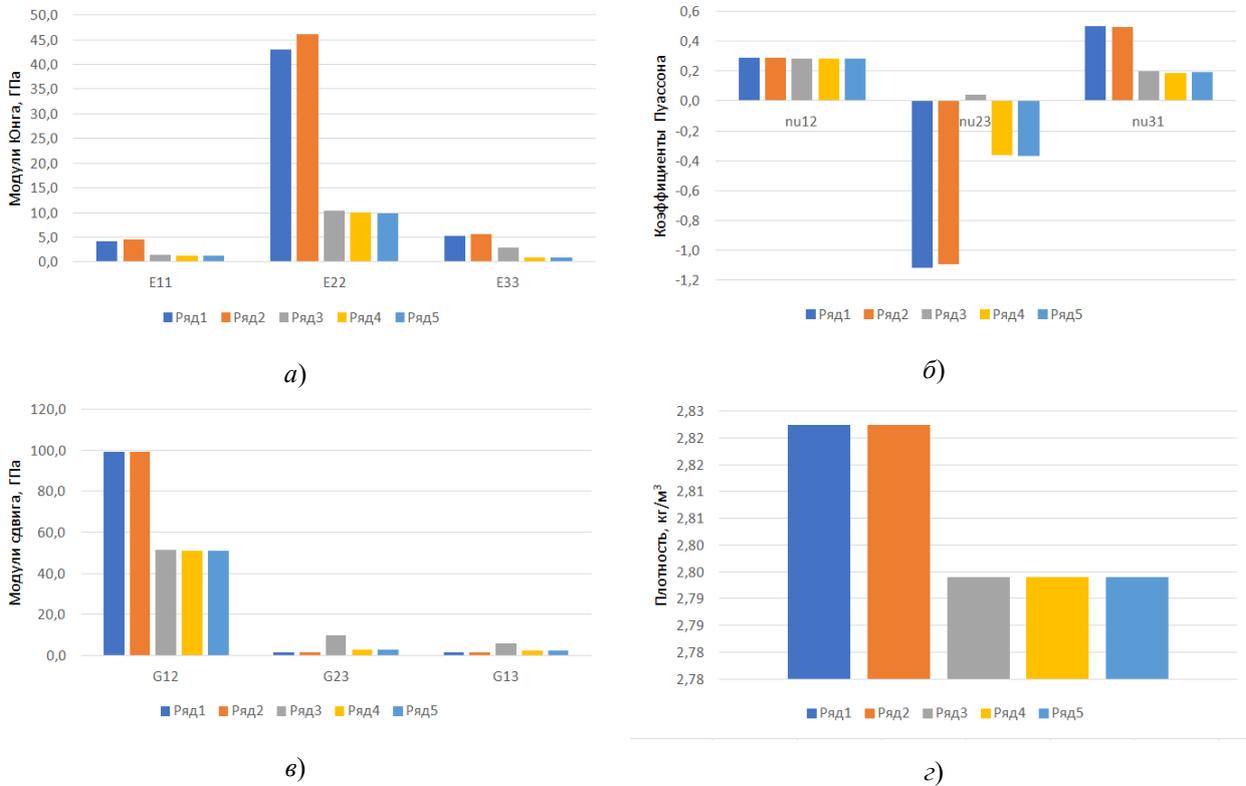


Рис. 5. Сопоставление результатов вычислений инженерных констант при изменении размеров сетки: *а* – модулей Юнга; *б* – коэффициентов Пуассона; *в* – модулей сдвига; *г* – плотности

На рис. 5 используются следующие обозначения: Ряд1 – метод Мори – Танака, улучшенная модель нити; Ряд2 – метод двойного включения, улучшенная модель нити; Ряд3 – метод спектральных

элементов, сетка  $100 \times 150 \times 50$ ; Ряд4 – метод спектральных элементов, сетка  $200 \times 300 \times 100$ ; Ряд5 – метод спектральных элементов, сетка  $300 \times 450 \times 150$ .

В результате исследования установлено, что все инженерные константы, полученные на сетках  $200 \times 300 \times 100$ ,  $300 \times 450 \times 150$  согласованы и дальнейшее измельчение сетки не имеет смысла. Коэффициент Пуассона  $\nu_{12}$ , полученный на сетки  $100 \times 150 \times 50$ , положителен, в то время как значения, полученные другими методами, отрицательны. Это позволяет сделать вывод о том, что используемая сетка недостаточно подробна.

### Заключение

Сопоставление результатов расчета показало, что метод Мори – Танака, использующий улучшенную модель нити, позволяет лучше других методов предсказывать значения эффективных характеристик упругости полимерно-металлических композитов на основе матрицы из нейлона и армирующего из нержавеющей стали.

При расчете инженерных констант для RVE подобного типа следует использовать достаточно мелкие сетки, размер которых превышает  $200 \times 300 \times 100$ . В то же время использование сеток, размер которых превышает  $300 \times 450 \times 150$ , не имеет смысла.

### Список литературы

1. Юрков Н. К., Якимов А. Н. Перспективы смешанного обучения в технических вузах // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2024. Т. 1. С. 289–291.
2. Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Учет технологических дефектов при проектировании изделий из полимерных слоистых композиционных материалов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 212–216.
3. Digimat 2023.1 MF User's.
4. Eshelby J. D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1957. № 241. P. 376–396.
5. Mori T., Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions // Acta Metallurgica. 1973. № 21. P. 571–574.

### References

1. Yurkov N.K., Yakimov A.N. Prospects of blended learning in technical universities. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2024;1: 289–291. (In Russ.)
2. Kartashova E.D., Muyzemnek A.Yu. Consideration of technological defects in the design of products made of polymer layered composite materials. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:212–216. (In Russ.)
3. *Digimat 2023.1 MF User's*.
4. Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1957;(241):376–396.
5. Mori T., Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*. 1973;(21):571–574.

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Екатерина Дмитриевна Карташова

ассистент кафедры теоретической и прикладной механики и графики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: katrina89@yandex.ru

#### Ekaterina D. Kartashova

Assistant of the sub-department of theoretical and applied mechanics and graphics, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Александр Юрьевич Муйземнек

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики и графики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: muyzemnek@yandex.ru

#### Aleksandr Yu. Muyzemnek

Doctor of technical sciences, professor, head of the sub-department of theoretical and applied mechanics and graphics, 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 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 05.05.2025**

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

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

УДК 629.7.017.1; 621.865.8

doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-10

### ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОАППАРАТУРЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

**А. В. Заяра<sup>1</sup>, В. П. Фандеев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Военный инновационный технополис «Эра», Анапа, Россия

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

<sup>1</sup>zaw1966@mail.ru, <sup>2</sup>fandvladpetr@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цель.* Современные мобильные робототехнические комплексы оснащаются сложной электроаппаратурой, которая служит причиной для более половины отказов, обусловленных деградационными процессами. Для обеспечения восстановления работоспособности комплексов требуется разработка новой системы технического обслуживания и ремонта. *Материалы и методы.* Рассматривается подход к оцениванию различных градаций технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов с использованием нечеткой классификации. Предлагается интеграция элементов проактивной концепции в существующую планово-предупредительную систему технического обслуживания и ремонта, что предполагает непрерывный контроль технического состояния по обобщенному параметру для определения момента возникновения состояния потенциального отказа. Для решения данной задачи применяется нечеткий логический вывод. *Результаты и выводы.* Подтверждение необходимости ремонтного воздействия производится вероятностным оцениванием текущего класса технического состояния.

**Ключевые слова:** мобильные робототехнические комплексы, техническое диагностирование, мониторинг технического состояния, концепция RCM, нечеткий логический вывод, классы работоспособности

**Для цитирования:** Заяра А. В., Фандеев В. П. Оценивание технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов с использованием нечеткой классификации // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 89–98. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-10

### ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT IN MOBILE ROBOTIC COMPLEXES USING FUZZY CLASSIFICATION

**A.V. Zayara<sup>1</sup>, V.P. Fandeyev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russia

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

<sup>1</sup>zaw1966@mail.ru, <sup>2</sup>fandvladpetr@gmail.com

**Abstract.** *Background.* Modern mobile robotic complexes are equipped with sophisticated electrical equipment, which causes more than half of the failures caused by degradation processes. To ensure the restoration of the complexes' operability, the development of a new maintenance and repair system is required. *Materials and methods.* An approach to assessing various gradations of the technical condition of electrical equipment of mobile robotic complexes using a fuzzy classification is considered. It is proposed to integrate elements of the proactive concept into the existing scheduled preventive maintenance and repair system, which involves continuous monitoring of the technical condition according to a generalized parameter to determine the moment of occurrence of a potential failure condition. Fuzzy inference is used to solve this problem. *Results and conclusions.* Confirmation of the need for repair effects is made by probabilistic assessment of the current class of technical condition.

**Keywords:** mobile robotic complexes, technical diagnostics, technical condition monitoring, RCM concept, fuzzy logic inference, operability classes

**For citation:** Zayara A.V., Fandeyev V.P. Assessment of the technical condition of electrical equipment in mobile robotic complexes using fuzzy classification. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):89–98. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-10

## Введение

В последнее время мобильные робототехнические комплексы (РТК) превратились в принципиально новый вид техники, предлагая уникальные возможности для выполнения сложнейших задач в различных условиях. Однако, как и любое сложное техническое изделие, эти комплексы нуждаются в эффективной системе технического обслуживания и ремонта (ТОиР), которая в настоящее время находится в стадии разработки. Это создает значительные трудности в процессе организации технической эксплуатации комплексов.

Одним из ключевых компонентов РТК является электроаппаратура, на долю которой приходится значительная часть отказов (до 50 %). Это делает техническое диагностирование (ТД) электроаппаратуры критически важной задачей для обеспечения требуемых значений показателей, составляющих надежности РТК. Анализ продолжительности операций ТО для сопоставимой по сложности аппаратуры ПТРК показывает, что ТД может занимать до 80 % всего времени обслуживания. Первой задачей ТД является контроль технического состояния, по результатам которого определяется один из его видов<sup>1</sup>. Согласно другому нормативному документу<sup>2</sup>, результаты контроля позволяют определить текущее состояние электроаппаратуры, классифицируя его как работоспособное, предельное или неработоспособное.

ТД как составная часть ТО является периодическим мероприятием и реализуется в рамках планово-предупредительной системы, которая в настоящее время применяется для обеспечения эксплуатации большинства технических систем. Однако традиционный подход к техническому обслуживанию не всегда позволяет оперативно реагировать на возникающие проблемы, что может приводить к неожиданным отказам, которые ставят под угрозу срыва выполнение боевых задач.

В связи с этим во вновь создаваемую для мобильных РТК систему ТОиР предлагается интегрировать элементы проактивной концепции, предполагающей непрерывный мониторинг технического состояния электроаппаратуры. Это позволит своевременно определять моменты проявления отказов и оптимизировать процесс восстановления. В данной статье рассматривается подход к оцениванию технического состояния электроаппаратуры наземных РТК на основе нечеткой классификации, что способствует повышению достоверности оценки технического состояния и, как следствие, улучшению показателей готовности комплексов.

## Материалы и методы

Одной из задач контроля технического состояния в рамках планово-предупредительной системы является подтверждение факта нахождения объекта диагностирования в предельном состоянии, которое определяется путем приближения значений контролируемых параметров к границам допусковых интервалов. Формальным основанием для определения предельного состояния служит критерий предельного состояния, представляющий собой совокупность признаков, установленных разработчиком, появление которых указывает на возникновение предельного состояния объекта. В данном контексте основным аргументом, который должен убедить эксплуатанта в необходимости назначения ремонтного воздействия, являются значения ресурса или срока сохраняемости.

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

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

Основное противоречие сложившейся ситуации заключается в необоснованной, с точки зрения достоверности, оценке текущего технического состояния РТК. Это приводит либо к отправке образца на ремонт при наличии достаточного остаточного ресурса, либо к преждевременному выведению изделия из эксплуатации в случае наступления внезапного отказа в промежутке между мероприятиями технического обслуживания (рис. 1).

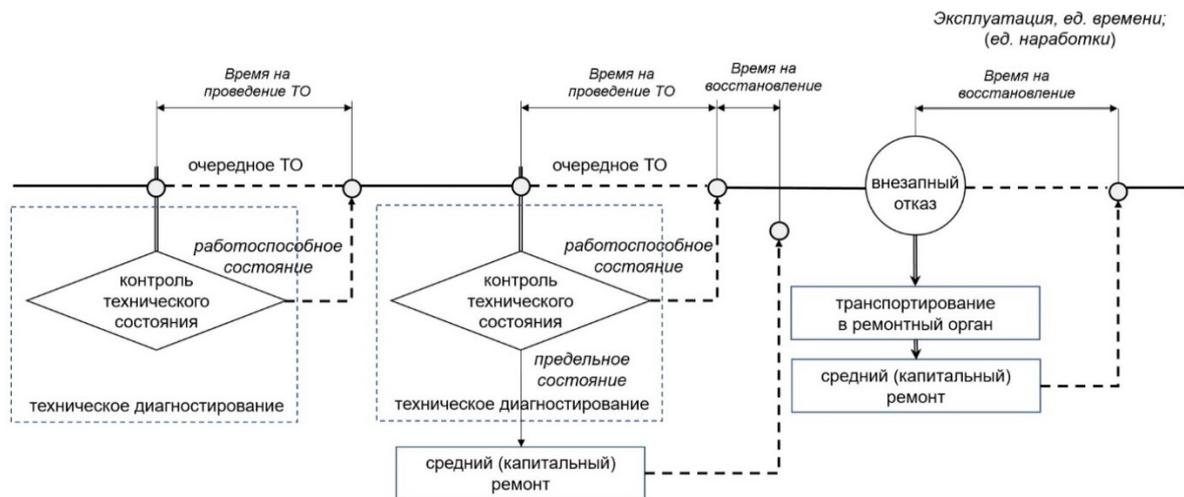


Рис. 1. Схема, поясняющая место ТД в планово-предупредительной системе ТОиР

Другими словами, наступление внезапного отказа, характеризующегося скачкообразным переходом в неработоспособное состояние, влечет за собой доставку неработоспособного РТК в ремонтный орган, где организуется восстановление работоспособности, которое начинается с поиска места и определения причин отказа. Как правило, в сложной электроаппаратуре эта процедура проводится на основе метода пробных замен или автономного метода [1]. Применение первого предполагает создание комплекта запасных частей, полностью дублирующего конструкцию РТК. Для реализации автономного метода задействуется дорогостоящая контрольно-проверочная аппаратура, с помощью которой контролируется техническое состояние каждого типового элемента замены. Затраты времени на транспортирование неработоспособного комплекса к месту ремонта и его восстановление в значительной степени ухудшают готовность объекта, которая функционально связана с показателями безотказности, ремонтпригодности и восстанавливаемости.

Возвратимся к проактивной концепции, обеспечивающей восстановление работоспособности изделия на основе данных о его фактическом техническом состоянии. Ее теоретические основы постулируют, что изначально все виды отказов присутствуют в зачаточном состоянии во всех технических системах. Они обусловлены конструкторскими, технологическими или эксплуатационными факторами. Воздействие совокупности данных факторов вызывает ускоренное развитие одного или нескольких отказов, которые становятся определяющими по отношению к работоспособности всего комплекса. Обоснованно назначая ремонтные воздействия с целью уменьшения влияния определяющих факторов, можно поддерживать работоспособное состояние электроаппаратуры в течение продолжительного времени [2].

Также согласно проактивной концепции электроаппаратура РТК подвержена старению, которое детерминируется деградиционными процессами, начиная с момента ввода в эксплуатацию. Применительно к промышленному оборудованию мера старения проявляется в снижении первоначально ожидаемого уровня производительности. Момент инициации этого снижения трактуется концепцией *RCM (Reliability-Centered Maintenance)* как признак потенциального отказа, указывающего на запуск деградиционных процессов. Если этот момент не выявляется, закономерным итогом ожидается наступление функционального отказа (событие перехода в состояние, характеризующееся невозможностью выполнять свои функции). Терминологией концепции *RCM* предусматривается «период развития отказа», определяемый как интервал *«P-F (Potential failure – Functional failure)»* между моментом времени, когда потенциальный отказ может быть выявлен, и моментом его перехода в функциональный отказ<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> SAE JA1011. Руководство по стандарту технического обслуживания для обеспечения надежности (Reliability-Centered Maintenance, RCM). 2002. 56 с.

Базовой составляющей проактивной концепции является перманентное оценивание технического состояния оборудования, которое имеет целью своевременное выявление начала интервала «*P-F*» с целью назначения ремонтного воздействия. Применительно к промышленному оборудованию задача мониторинга, которая заключается в идентификации текущего состояния объекта, выполняется очень просто. В нормативном документе, определяющем концепцию *RCM*, в качестве примера рассматривается насос для перекачки воды из одного резервуара в другой с номинальной мощностью 1000 л/мин. Считается, что состояние потенциального отказа наступает в тот момент, когда из-за старения производительность насоса становится менее 800 л/мин.

Для мобильных РТК транспортного назначения, выполняющих задачи материально-технического обеспечения в различных ландшафтных и погодных условиях, численное оценивание производительности электроаппаратуры РТК с целью последующего анализа изменений ее показателей представляет собой сложную задачу. В отличие от промышленного насоса, который устанавливается в помещении с практически неизменным температурным диапазоном, транспортные РТК перевозят различные грузы по пересеченной местности в течение всего года. Таким образом, с учетом эксплуатации комплекса в сложных, непредсказуемых условиях необходимо найти решение, позволяющее не только зафиксировать момент вхождения в интервал «*P-F*», но и аргументированно подтвердить начало развития потенциального отказа.

Внедрение проактивной концепции предусматривает обязательную оценку фактического состояния, перманентно проводимую в режиме реального времени. Несмотря на то, что в работе [3] рассматривается концепция эксплуатации по состоянию, в ней также делается акцент на сбор и накопление диагностической информации в процессе контроля технического состояния. В традиционном представлении реализация такой процедуры заключается в выборе определенной совокупности диагностических параметров, для которых по результатам контроля оценивается нахождение их значений в заданных границах областей работоспособности. Если хотя бы для одного из параметров это условие не соблюдается, объект диагностирования признается неработоспособным.

При внешней простоте такого подхода его реализация наталкивается на ряд существенных трудностей. Прежде всего, это относится к выбору совокупности параметров. Как правило, такими параметрами являются выходные параметры отдельных функциональных элементов, а совокупность параметров выбирается в зависимости от предъявляемых требований (минимум затрат на диагностирование в сочетании с максимумом достоверности контроля при ограничении его продолжительности). Очевидно, что в зависимости от целевой функции совокупность параметров будет различной, а следовательно, и качество оценки технического состояния будет меняться. Кроме того, весьма жестким является требование о взаимной независимости диагностических параметров [3].

Значительные трудности возникают при аппаратной реализации этого подхода. Возникает потребность в значительном числе разнородных первичных преобразователей, что сопровождается усложнением аппаратуры встроенного контроля. В качестве альтернативного варианта предлагается переход к комплексному контролю, осуществляемому на основе анализа обобщенного параметра, под которым понимается искусственно синтезируемый сигнал, характеризующий техническое состояние электроаппаратуры в целом [3].

Для решения задачи оценивания технического состояния электроаппаратуры в режиме реального времени предлагается отождествить ее производительность с энергоэффективностью, комплексно характеризующей техническое состояние всего робота. Для этого вводится искусственная характеристика «нагруженность», под которой понимается внесистемная величина, отражающая эффективность функционирования комплекса в процессе применения по назначению по отношению к величине потребляемой энергии. Численно оценивать эту характеристику предлагается с использованием нечеткого логического вывода в процессе мониторинга технического состояния [4].

Эта величина интегрально оценивает техническое состояние всей электроаппаратуры в процессе выполнения комплексом своих функций в интервале значений от 0 до 1 и учитывает энергетические показатели (потребляемый ток и скорость движения), влияющие на долговечность электроаппаратуры. Ее текущее значение определяется на основе комплексирования данных о входных величинах (лингвистических переменных): линейной скорости движения  $v(t)$ , м/с, и потребляемого тока  $I(t)$ , А, поступающих с проприоцептивных датчиков. Для каждой из них на основе экспертного оценивания устанавливаются 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 [5]. Пример такой базы представлен в табл. 1.

База правил для модели нечеткого логического вывода

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

Возвращаясь к условию определения состояния потенциального отказа РТК, априорно можно сделать вывод, что потенциальному отказу, при котором производительность начинает снижаться, априорно может быть сопоставлен уровень нагруженности «критический» с сочетанием термов «низкая» скорость и «большое» значение потребляемого тока. Из базы исключаются сочетания термов «высокая» и «средняя» скорость с терминами «слабый» и «средний» для потребляемого тока как противоречащие закону сохранения энергии.

Сочетание термов «низкая скорость» и «большой ток» отождествляется с уровнем нагруженности «критический». Выдвигается гипотеза, что класс технического состояния проявляется одновременно с запуском процессов, которые в итоге приведут к функциональному отказу. Предположительно такое сочетание термов должно сигнализировать о зарождении и развитии в электроаппаратуре потенциального отказа.

Возвращаясь к нечеткому логическому выводу на основе импликации Мамдани, который используется для определения значения нагруженности  $Q(t)$ , следует отметить его уникальную способность оценивать энергоэффективность электроаппаратуры в различных условиях использования РТК. Реализация данного подхода осуществляется по схеме продукционного правила «если ..., то ...» между нечеткими множествами. Для оценивания значения нагруженности применяется правило

*modus ponens*:  $\frac{A, A \rightarrow B}{B}$ : если истинно высказывание  $A$  и из  $A$  следует  $B$ , то высказывание  $B$  будет

тоже истинным. Нечеткая импликация используется для установления связи между входными данными и выводом. В общем виде для конкретного момента времени  $t_i$  значение нагруженности формализуется следующим образом:

$$Q(t_i) = \sup T(\mu_{Q(t)}(x), \mu_R(I(t_i), v(t_i))), \quad (1)$$

$$\mu_R(I(t_i), v(t_i)) = I_M(\mu_A(I(t_i)), \mu_B(v(t_i))),$$

$$\text{как импликация по Мамдани } I_M(a, b) = \min\{a, b\},$$

где  $\mu_{Q(t)}(x)$  – текущее значение функции принадлежности для нагруженности  $Q(t_i)$ ,  $x \in [0, 1]$ ;  $\sup T$  – верхняя граница треугольной конормы ( $t$ -конормы): объединения функций принадлежности входной и выходной величин  $\mu_R(I(t_i), v(t_i))$ ;  $I_M(a, b)$  – результат нечеткой импликации по Мамдани, реализующей логическое умножение значений функций принадлежности;  $\mu_A(I(t_i))$  и  $\mu_B(v(t_i))$  – значения функций принадлежности, соответственно, для величин потребляемого тока  $I(t_i)$  и скорости  $v(t_i)$ .

Согласно правилу *modus ponens*, продукция типа «если величины тока и скорости принимают значения  $I(t_i)$  и  $v(t_i)$ , то значение нагруженности принимает вид  $Q(t_i)$ » рассчитывается в следующей последовательности:

- 1) проводится фаззификация: определяются значения функций принадлежности при текущих значениях входных величин  $\mu_A(I(t_i))$  и  $\mu_B(v(t_i))$ ;
- 2) рассчитывается степень истинности предпосылок  $\alpha_j = \min(\mu_A(I(t_i)), \mu_B(v(t_i)))$ ;
- 3) определяется степень истинности следствий  $\mu_{Q(t)}(x) = \min(\alpha_j, \mu_{Q(t)}(x))$ ;

4) строится композиция следствий:  $MF(x) = \max(\mu_{Q(t_i)}(x))$ ;

5) осуществляется дефаззификация:  $x^* = \frac{\int_{\min}^{\max} xMF(x) dx}{\int_{\min}^{\max} MF(x) dx}$ .

Текущему значению нагруженности присваивается  $Q(t_i) = x^*$  [6].

Для формального подтверждения наступления момента активации механизма, способного привести к функциональному отказу, предлагается создать координатную плоскость на основе базы правил, на которой по оси абсцисс откладывается скорость  $v(t)$ , м/с, а по оси ординат – величина потребляемого тока  $I(t)$ , А. Плоскость разделена на прямоугольники, границы которых определяются диапазонами термов.

Каждый прямоугольник характеризует класс технического состояния комплекса, сопоставляя каждому сочетанию термов условный класс работоспособности  $R$ . Применительно к результатам импликации класс работоспособности трактуется как нечеткая параметрическая категория, которая характеризует текущее состояние электроаппаратуры с точки зрения производительности в режиме реального времени. «Нечеткость» каждого класса будет определяться сочетанием термов входных величин. Например, в определенный момент времени  $t_i$  при «низкой» скорости движения и «средней» величине потребляемого тока уровень нагруженности будет оцениваться как «тяжелый» (табл. 2). Численное подтверждение обеспечивается результатом нечеткого логического вывода (1).

Рассчитанные значения нагруженности распределяются по численным интервалам:

- $0 < Q(t) \leq 0,33$  – легкий;
- $0,25 < Q(t) \leq 0,66$  – умеренный;
- $0,66 < Q(t) \leq 0,95$  – тяжелый;
- $0,95 < Q(t) < 1,0$  – критический.

Таблица 2

Классы состояний  $R$  электроаппаратуры мобильного РТК

Скорость $v(t)$ , м/с	Потребляемый ток $I(t)$ , А		
	Слабый	Средний	Большой
Низкая	Легкий	Тяжелый	Критический
Средняя	⌀	Умеренный	Тяжелый
Высокая	⌀	⌀	Умеренный

Каждый класс работоспособности  $R_i$  соответствует назначенному интервалу нагруженности со своим термом. Априорно выдвигается гипотеза, что состояние потенциального отказа для транспортного РТК, свидетельствующего об ухудшении энергоэффективности, наступает в момент перехода нагруженности на критический уровень при  $Q(t) > 0,95$ .

Тем не менее численное значение  $Q(t)$  является условным показателем, обладающим значительной долей неопределенности. Его значение подтверждает принадлежность текущего состояния электроаппаратуры к тому или иному классу работоспособности с субъективной степенью уверенности, поскольку формализация функций принадлежности для лингвистических переменных производится на основе экспертного оценивания. Решить задачу вероятностного подтверждения предлагается с использованием метода ядерной оценки плотности вероятности (в англоязычной научной литературе именуется «*Kernel density estimation, KDE*») [7].

### Результаты и выводы

В классическом представлении в качестве вероятностной модели используется многомерное Гауссово распределение, основанное на допущении о независимости диагностических признаков [8]. В качестве альтернативного варианта предлагается использовать математический аппарат, позволяющий сохранить информацию о потенциальных зависимостях между случайными величинами. В частности, вместо представления многомерного распределения как произведения одномерных нормальных распределений, совместная плотность распределения определяется с помощью *KDE*-подхода, предоставляющего возможность адекватной оценки многомерных распределений. Оптимальным с точки зрения автора видится применение ядра Епанечникова [7].

Сущность этого метода применительно к двумерному распределению контролируемых параметров (скорости движения  $v(t)$  и величине потребляемого тока  $I(t)$ ) заключается в оценке плотности вероятности их распределения, основываясь на их значениях в двумерном пространстве. Статистические выборки  $v(t)$  и  $I(t)$  начинают формироваться в момент превышения нагруженностью порога уровня «критический» с частотой дискретизации проприцептивных датчиков. В течение времени нахождения значения нагруженности  $Q(t) > 0,95$  оценивается совместная плотность распределения значений контролируемых параметров [7]:

$$\hat{f}(v, I) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K_E \left( \frac{v - v_j}{h}, \frac{I - I_j}{h} \right), \quad (2)$$

где  $n$  – объем выборки;  $h$  – параметр сглаживания, зависящий от величины  $n$ ;  $K_E$  – ядро Епанечникова, которое определяется системой

$$\hat{f}(v, I) = \begin{cases} \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n \frac{3}{4} \left( 1 - \frac{v^2 + I^2}{h^2} \right), & v^2 + I^2 \leq h^2; \\ 0, & v^2 + I^2 > h^2. \end{cases}$$

Ядро Епанечникова  $K_E$ , обладающее формой «купола», позволяет получить непрерывную оценку плотности. Этот метод эффективно учитывает локальные особенности распределения, обеспечивая более точное представление о вероятностной структуре, при этом позволяя избегать противоречия зависимости случайных величин.

График плотности (рис. 2) строится в вероятностном пространстве, в котором плоскость, образованная осями абсцисс и ординат, формируется путем трансформации базы правил входных величин на основе классов состояний  $R$  (табл. 2). По оси аппликат применительно к рассматриваемому случаю совместного распределения откладывается плотность вероятности (2).

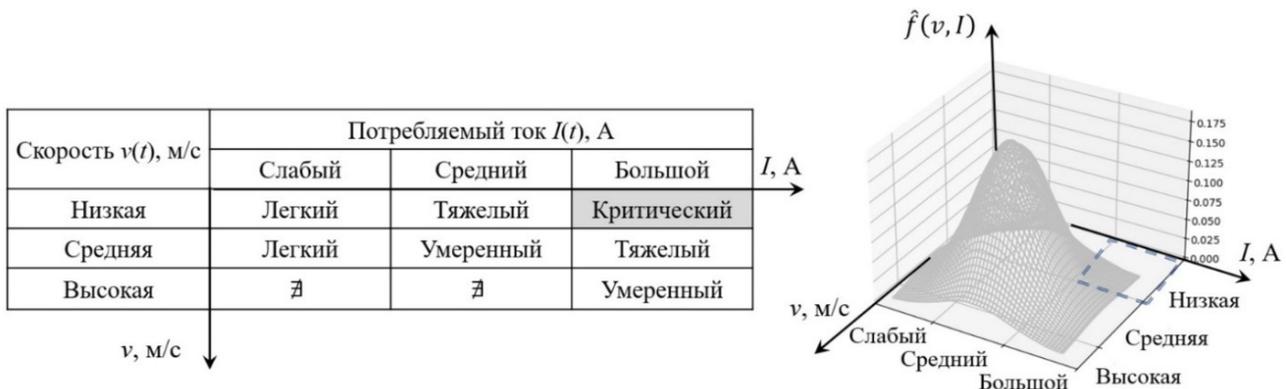


Рис. 2. Пример графика плотности совместной вероятности контролируемых параметров, построенный в Python методом KDE

Применение встроенных библиотек Python [9] для реализации метода KDE предоставляет необходимые инструменты для визуализации и статистической классификации. Решение второй задачи сводится к оцениванию вероятности принадлежности текущего состояния объекта диагностирования к выбранному классу. Значение этой вероятности определяется как двойной интеграл в заданных интервалах изменения случайных величин. Для рассматриваемого примера геометрической интерпретацией оценивания вероятности попадания значений случайных величин  $v(t)$  и  $I(t)$  в определенные интервалы является величина объема под поверхностью, заданной совместной плотностью распределения. Этот объем соответствует вероятности и визуализируется в виде параллелепипеда, основание которого представляет собой прямоугольник со сторонами, совпадающими с границами класса работоспособности.

Заключительным шагом в процедуре статистической классификации является переход от поверхности совместного распределения контролируемых параметров к пространственной гистограмме, которая позволяет оценить вероятности принадлежности текущего состояния электроаппаратуры к каждому из классов работоспособности. В частности, особый интерес представляет вероятность возникновения

критического состояния для сочетания термов контролируемых величин: низкая скорость и высокое потребление тока. Процедура распределения значений вероятности по классам работоспособности поясняется гистограммой на рис. 3.

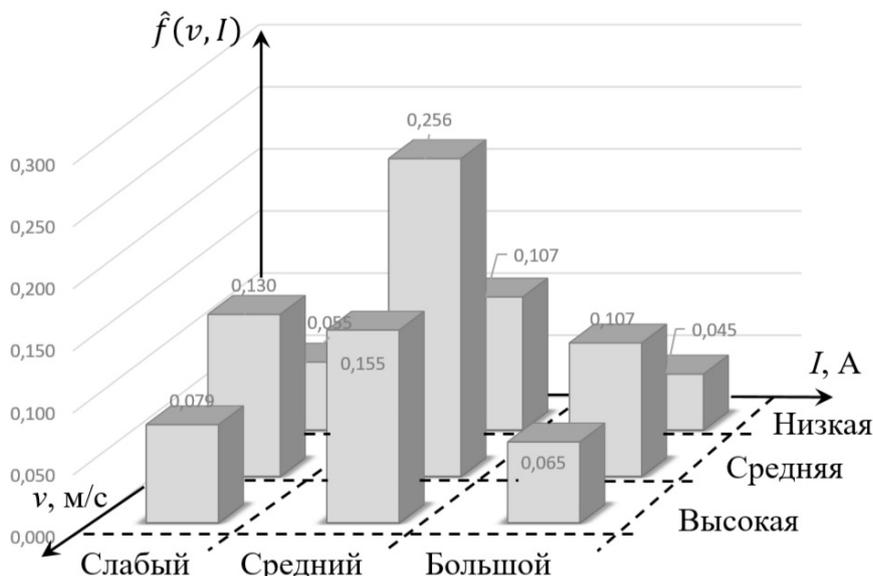


Рис. 3. Гистограмма, поясняющая распределение вероятности принадлежности текущего состояния к классам работоспособности

### Заключение

Решение задачи регистрации момента вхождения электроаппаратуры мобильных РТК в интервал « $P-F$ », для которых традиционные методы не позволяют явно зафиксировать снижение производительности, достигается путем фиксации момента достижения нагруженности установленного порога  $Q(t) > 0,95$ . Нахождение в критическом состоянии может быть вызвано кратковременными факторами, такими как перегрузка, налипание грунта или снега на гусеницы и т.п. Для недопущения необоснованных выводов о наступлении функционального отказа следует перейти от результатов нечеткого вывода к вероятностной оценке технического состояния.

Аргументированное подтверждение принадлежности текущего состояния электроаппаратуры к определенному классу работоспособности достигается оценкой вероятности попадания контролируемых величин в заданные интервалы, формирующие этот класс.

Определение начала процесса развития отказа должно априорно соответствовать периоду определенной длительности, в течение которого уровень текущего состояния классифицируется как «критический». Продолжительность этого периода предполагается оценивать на основе результатов ускоренных испытаний РТК. Предварительная оценка принадлежности текущего состояния к конкретному классу работоспособности осуществляется при превышении вероятностью порога в 0,2.

Таким образом, предложенный математический аппарат обоснования момента назначения ремонтного воздействия как элемента проактивной концепции ТОиР будет способствовать повышению готовности РТК.

### Список литературы

1. Фандеев В. П. Технологии и средства анализа отказов восстанавливаемых электронных изделий приборостроения : монография. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 193 с.
2. Проактивная концепция ТОиР // Ассоциация ЕАМ. URL: <https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html> (дата обращения: 16.03.2025).
3. Барзилович Е. Ю., Воскобоев В. Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию (Элементы теории). М. : Транспорт, 1981. 197 с.
4. 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

5. 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
6. Броневи́ч А. Г., Лепский А. Е. Нечеткие модели анализа данных и принятия решений : учеб. пособие. М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. 264 с.
7. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применение. 1969. № 14:1. С. 156–161.
8. 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.
9. Seaborn Kdeplot – A Comprehensive Guide // Geeksforgeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/seaborn-kdeplot-a-comprehensive-guide/> (дата обращения: 21.03.2025).

### References

1. Fandeev V.P. *Tekhnologii i sredstva analiza otkazov vosstanavlivaemykh elektronnykh izdeliy priborostroeniya: monografiya = Technologies and means of failure analysis of recoverable electronic instrumentation products : monograph*. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2000:193. (In Russ.)
2. Proactive MRO concept. *Assotsiatsiya EAM = EAM Association*. (In Russ.). Available at: <https://eam.su/proaktivnaya-koncepciya-toir.html> (accessed 16.03.2025).
3. Barzilovich E.Yu., Voskoboev V.F. *Ekspluatatsiya aviatsionnykh sistem po sostoyaniyu (Elementy teorii) = State-of-the-art operation of aviation systems (Elements of theory)*. Moscow: Transport, 1981:197. (In Russ.)
4. Danilin M.E., Zayara A.V. Modeling the process of changing the technical condition of electrical equipment of robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):21–30. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-3
5. 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 system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):120–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
6. Bronevich A.G., Lepskiy A.E. *Nechetkie modeli analiza damnykh i prinyatiya resheniy: ucheb. posobie = Fuzzy models of data analysis and decision-making : textbook*. Moscow: Izd. dom Vyshey shkoly ekonomiki, 2022:264. (In Russ.)
7. Epanechnikov V.A. Nonparametric estimation of multidimensional probability density. *Teoriya veroyatnosti i ee primeneniye = Probability theory and its application*. 1969;(14:1):156–161. (In Russ.)
8. Gaskarov D.V., Golinkevich T.A., Mozgalevskiy A.V. *Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury = Forecasting the technical condition and reliability of electronic equipment*. Moscow: Sov. radio, 1974:224. (In Russ.)
9. Seaborn Kdeplot – A Comprehensive Guide. *Geeksforgeeks*. Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/seaborn-kdeplot-a-comprehensive-guide/> (accessed 21.03.2025).

### Информация об авторах / Information about the authors

#### 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](mailto:zaw1966@mail.ru)

#### Владимир Петрович Фандеев

доктор технических наук, профессор,  
преподаватель кафедры общетехнических дисциплин,  
Филиал Военной академии  
материально-технического  
обеспечения имени генерала армии  
А. В. Хрулева в г. Пензе  
(Россия, г. Пенза, Военный городок)  
E-mail: [lyudmilarotmanova@yandex.ru](mailto:lyudmilarotmanova@yandex.ru)

#### Andrey V. Zayara

Candidate of technical sciences,  
senior research fellow of the research department,  
Military Innovative Technopolis "ERA"  
(41 Pionersky avenue, Anapa, Russia)

#### Vladimir P. Fandeyev

Doctor of technical sciences, professor,  
lecturer of the sub-department  
of general technical disciplines,  
Branch of the Military Academy  
of Logistics named after Army General  
A.V. Khrulev in Penza  
(Military town, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 02.05.2025**

## ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА

В. П. Перевертов<sup>1</sup>, Н. К. Юрков<sup>2</sup>, Н. В. Чертыковцева<sup>3</sup>, В. Н. Новикова<sup>4</sup>, Н. А. Кузин<sup>5</sup>

<sup>1,4</sup> Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

<sup>2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>3</sup> Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

<sup>5</sup> Московский автомобильный институт (технический университет), Москва, Россия

<sup>1</sup> vpervertov@yandex.ru, <sup>2</sup> yurkov\_NK@mail.ru, <sup>3</sup> pmish@samsmu.ru,

<sup>4</sup> novikova@samgups.ru, <sup>5</sup> sputnik1985nk3y@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Представлена диагностическая система оптимизации режимов работы системы охлаждения дизеля тепловоза, составными элементами которой являются: алгоритм диагностирования и подбор аппаратных средств при импортозамещении, структурно-функциональная схема (модель). *Материалы и методы.* Система адаптирована к изменениям температуры наружного воздуха за счет применения методов идентификации тепловых параметров в режимах охлаждения-прогрева силовых установок тепловозов; реализована на основе контроллера-конструктора LDM-SAM7X128. Программное обеспечение написано на языке C++ с частичным использованием языка Assembler. *Результаты и выводы.* Предлагаемый алгоритм и методы диагностирования позволяют повысить надежность силового оборудования в составе ПС скоростной транспортной системы ОАО «РЖД». Диагностическая система, оборудованная интеллектуальным датчиком, автоматизирует этот процесс, считывая его параметры по цифровому каналу с чипа ЭПД. Спецификация TEDS позволяет реализовать автоматическое конфигурирование датчика и упростить его согласование с другой электронной аппаратурой. Вся информация о датчике хранится в TEDS-памяти встроенной микросхемы, отпадает необходимость в создании отдельной базы данных для хранения калибровочной информации.

**Ключевые слова:** тепловоз, дизель, водяная (масляная) система, охлаждение, алгоритм, диагностическая автоматизированная система, датчики, контроллер

**Для цитирования:** Перевертов В. П., Юрков Н. К., Чертыковцева Н. В., Новикова В. Н., Кузин Н. А. Диагностическая система оптимизации режимов охлаждения дизеля тепловоза // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 99–108. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-11

## DIAGNOSTIC SYSTEM FOR OPTIMIZING THE DIESEL LOCOMOTIVE COOLING MODES

V.P. Perevertov<sup>1</sup>, N.K. Yurkov<sup>2</sup>, N.V. Chertykovtseva<sup>3</sup>, V.N. Novikova<sup>4</sup>, N.A. Kuzin<sup>5</sup>

<sup>1,4</sup> Volga State Transport University, Samara, Russia

<sup>2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>3</sup> Samara State Medical University, Samara, Russia

<sup>5</sup> Moscow Road Institute (Technical University), Moscow, Russia

<sup>1</sup> vpervertov@yandex.ru, <sup>2</sup> yurkov\_NK@mail.ru, <sup>3</sup> pmish@samsmu.ru,

<sup>4</sup> novikova@samgups.ru, <sup>5</sup> sputnik1985nk3y@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The paper presents a diagnostic system for optimizing the operating modes of the diesel locomotive cooling system, the components of which are: a diagnostic algorithm and hardware selection for import substitution, a structural and functional diagram (model). *Materials and methods.* The system is adapted to changes in outside air temperature by using methods for identifying thermal parameters in the cooling-warming modes of diesel locomotive power plants; it is implemented on the basis of the ldm-sam7x128 controller-designer. The software is written in C++ with partial use of the assembler language. *Results and conclusions.* The proposed algorithm and diagnostic methods make it possible to increase the reliability of power equipment in the substation of the Russian Railways high-speed transport system. A diagnostic system equipped with an intelligent sensor automates this process by reading its parameters via a digital channel from the EPD chip. The TEDS specification allows for automatic configuration of the sensor and simplifies its alignment with other electronic equipment. All information about the sensor is stored in the

TEDS memory of the integrated circuit, eliminating the need to create a separate database for storing calibration information.

**Keywords:** diesel locomotive, diesel, water (oil) system, cooling, algorithm, automated diagnostic system, sensors, controller

**For citation:** Perevertov V.P., Yurkov N.K., Chertykovtseva N.V., Novikova V.N., Kuzin N.A. Diagnostic system for optimizing the diesel locomotive cooling modes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(2):99–108. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-11

Работа посвящена вопросу повышения надежности системы охлаждения силового оборудования (дизелей) тепловозов при их эксплуатации в условиях ОАО «РЖД» с учетом контроля параметров и технического состояния машины, составными частями которой являются:

- 1) построение и изучение структурно-функциональных и математических моделей;
- 2) исследование систем диагностики (СД);
- 3) поддержание заданных условий выполнения оборудования;
- 4) предупреждение поломок и своевременная остановка оборудования в аварийных ситуациях;
- 5) прогнозирование развивающихся дефектов, приводящих к отказам с целью уточнения сроков ремонта;
- 6) проверка качества ремонта;
- 7) исключение вредного влияния технологических сред (шум, вибрации и т.д.) на машиниста.

Для обеспечения надежной работы силового оборудования (ДВС, электродвигатели и т.д.) тепловозов и путевых машин (ПМ) диагностика отказов (дефектов, неисправностей) должна осуществляться на всех этапах его срока службы:

- 1) проектирования;
- 2) установки и монтажа;
- 3) эксплуатации;
- 4) на стадии ремонтных работ.

Наиболее важным в железнодорожной отрасли является автоматизация выполнения диагностических работ на стадии **эксплуатации и ремонта**.

Программно-аппаратная система, осуществляющая функции диагностирования технического объекта в автоматическом (автоматизированном) режиме называется системой диагностирования (СД) и состоит:

- 1) из подсистемы аппаратных средств (технологические датчики – контактные и бесконтактные на основе лазерных, ультразвуковых, фотонных селективных, волоконно-оптических методов измерения и т.д.);
- 2) подсистемы программных средств, реализованной на основе контроллера-конструктора LDM-SAM7X128.

Программное обеспечение написано на языке C++ с частичным использованием языка Assembler.

При разработке СД должны выполняться основные требования:

- 1) модульность построения и открытость структуры;
- 2) гибкость связей и оптимальный алгоритм диагностирования (рис. 1);
- 3) рациональность соотношения программных и аппаратных подсистем;
- 4) рациональность обработки поступающей информации на микрокомпьютере и непосредственно на аппаратных средствах обработки измерительной информации (периферии СД);
- 5) быстрая перенастраиваемость и восстанавливаемость в условиях РЖД;
- 6) рациональность сочетания достаточной точности диагностирования с высокой производительностью;
- 7) инвариантность систем контроля и диагностики программно-адаптивного управления;
- 8) эргономичность и визуальный комфорт машиниста-оператора.

Одним из требований информационного обеспечения системы диагностирования ДВС является **матрица отказов и матрица соответствия кодовых слов отказов и измеряемых параметров** модуля, формирующиеся на основе статистики отказов. Разработан алгоритм диагностирования (рис. 1), который можно использовать на уровне диагностики ПС при наличии соответствующих матриц [1–5].

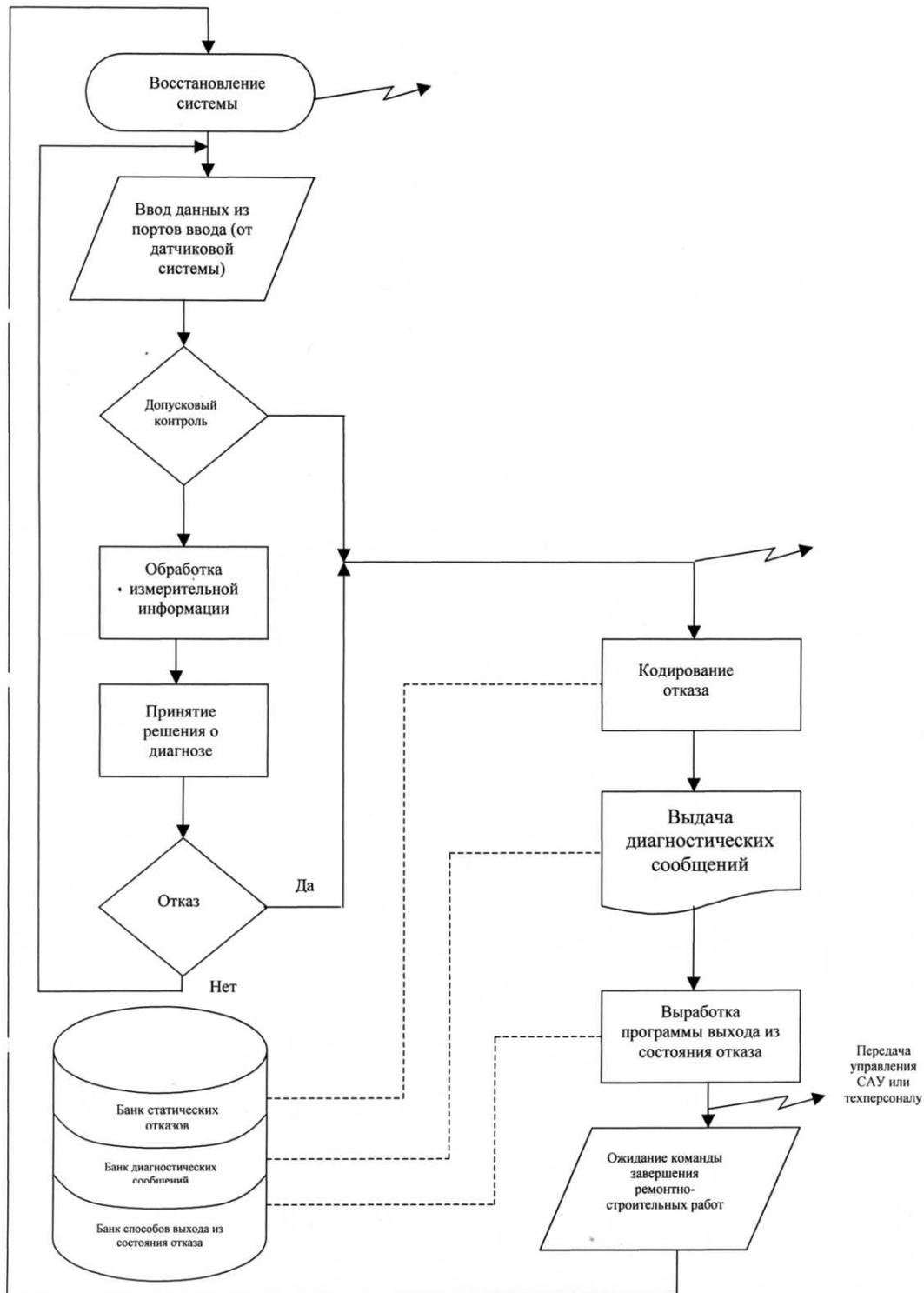


Рис. 1. Алгоритм диагностирования

Для определения технического состояния ПС можно применять преобразования, инвариантные к неинформативным параметрам ПМ и датчики, структуры которых инвариантны к неинформативным параметрам, воздействующим как на сам объект управления, так и на элементы структуры датчиков. При этом повышается точность определения технического состояния ПС (ПМ), а обеспечение высокой надежности возможно при создании СД с развитой математической инфраструктурой на базе ЭВМ [2–5]. Система диагностики (СД) – это технологический процесс определения технического состояния объекта диагностирования с определенной **точностью** с указанием **места, вида и причин отказов** (дефектов), **пути** выхода из состояния отказа с использованием следующих **методов диагностирования**:

1. **Метод временных интервалов** применяется для анализа простоев, определения показателей надежности, контроля режимов работы, расчета кинематических, гидравлических параметров и т.д. и позволяет осуществить первичную локализацию места дефекта (неисправности).

2. **Метод эталонных моделей** основан на сравнении числовых значений параметров (крутящих моментов, давлений, вибраций и т.д.) с их паспортными данными и нормами технических условий.

3. **Метод эталонных зависимостей** основан на сравнении экспериментально полученных функциональных зависимостей параметров проверяемого узла системы с эталонными, найденными расчетным или экспериментальным путем, что позволяет повысить достоверность диагноза.

4. **Метод эталонных осциллограмм** применяется для выявления дефектов оборудования, для которого характерны низкочастотные динамические процессы и создании базы осциллограмм, характеризующих ее дефекты. Высокая информативность, наглядность используется при профилактике, уточнении диагноза.

5. **Метод сопоставления и наложения осциллограмм** основан на анализе одновременно записанных осциллограмм различных параметров или одного и того же параметра и эффективен при профилактических осмотрах.

6. **Корреляционные методы** применяются для обнаружения отклонений в характере зависимости между параметрами (взаимная корреляция) или в изменении параметра во времени.

7. **Спектральные и спектрально корреляционные методы** основаны на выделении и изменении составляющих сложных сигналов от высоко и низкочастотных процессов. Используются при виброакустических методах диагностирования, требуют сложной аппаратуры и математического обеспечения.

8. **Метод определения предельных (аварийных) состояний** основан на обнаружении факта без точного количественного определения выходных параметров технологических систем в недопустимый диапазон: понижение уровня масла в гидросистеме пресса, повышение температуры масла, отключение электроэнергии и т.д.

9. **Тестовые методы диагностирования** – подача стимулирующих сигналов.

Из рассмотренных методов для диагностирования привода ПС (ПМ) могут быть использованы методы 1–5, 9; для диагностирования системы управления – 1, 4, 9; для диагностирования основных механизмов и вспомогательных устройств – все методы. Целесообразно при эксплуатации ПМ проводить диагностирование его элементов с применением различных методов и выделением перспективных их комбинаций для последующего использования. Программное обеспечение создается в процессе разработки систем управления с пакетом диагностических программ. На рис. 1 представлен алгоритм функционирования системы диагностики, составными частями которой является банк статистик отказов, банк диагностических сообщений и банк способов выхода из состояния отказа [2–5].

При создании, модернизации и совершенствовании тепловозных систем охлаждения важно установить влияние конструктивных, эксплуатационных и теплотехнических факторов на протекание процессов тепломассообмена в режимах свободного охлаждения силовых установок тепловозов и выбрать наиболее оптимальные решения из множества вариантов с применением экспериментальных и математических методов моделирования. Экспериментальные методы дают наиболее достоверные результаты, однако они трудоемки и не дают практически проверить многие варианты.

Для решения этой задачи проведен анализ различных способов и систем охлаждения (нагрева) силового оборудования (ДВС) на основе использования общепринятой математической модели процессов нагрева/охлаждения. Спроектированная СД базируется на математической модели, которая учитывает изменение температуры окружающей среды. При моделировании процессов охлаждения элементов водяной системы тепловозного дизеля водяная система рассматривалась как регулируемый объект системы автоматического регулирования теплового состояния энергоустановки тепловоза [1, 2, 6, 7]. Регулирующей величиной является тепловая мощность, передаваемая водяной системе в результате работы дизеля на холостом ходу, представляющая собой температуру воды в контролируемых элементах водяной системы. Предложенная модель может быть распространена на большинство элементов водяной системы энергоустановки. Вместе с тем синтез водяной системы теплового состояния энергоустановки тепловоза основывается на контроле **температуры** воды в наиболее теплоемком элементе водяной системы.

Система оптимизации режимов работы системы охлаждения дизеля тепловоза предназначена для **измерения, обработки, отображения и регистрации температуры** теплоносителей в масляной и водяной системах тепловозного дизеля и автоматического регулирования режимами их охлаждения и решает следующие задачи:

1) измерение и отображение в реальном времени температуры воды в водяной системе дизеля (+ 20 ... + 80 °С), масла в масляной системе дизеля (+ 10 ... + 60 °С) с пределом допустимого значения погрешности измерения  $\pm 5\%$ ;

2) выбор оптимального режима охлаждения теплоносителей.

Выполнение задач происходит на основе предложенной СД дизеля, которая имеет двухуровневую архитектуру, и состоит:

1) из уровня датчиков;

2) уровня оператора, который объединяет в себе функции сбора данных и взаимодействие с машинистом.

СД включает в себя блок ввода-вывода информации; блок анализа данных и управления; блок управления исполнительными органами (агрегатами) и датчики температуры.

Алгоритм функционирования системы охлаждения предусматривает четыре основных режима работы:

1. Ввод параметров для оценки технического состояния системы с установкой реального времени, температурных параметров секций ТА и теплоносителей (вода, масло).

2. Режим контроля температуры секций теплового модуля – производится замер температуры теплоносителя на выходе из секций теплового аккумулятора (ТА). Если температура соответствует рекомендованным значениям, то система работает в нормальном состоянии. Если температура превышает заданные, то модуль включается в общую цепь.

3. Режим контроля температуры холодильника – производится замер температуры воды в системе охлаждения и температуры масла в масляной системе дизеля. В зависимости от их значений может быть три варианта забора тепла.

4. Комбинированный режим забора тепла – предварительно осуществляется проверка температуры теплоносителей (вода, масло). Если температуры соответствуют необходимым по техническим требованиям, то прокачка теплоносителей не включена и идет постоянный опрос датчиков температуры воды и температуры масла. Система находится в состоянии ожидания. Если температуры теплоносителей выше допустимых норм, то включается процесс их прокачки через секции 1 и 2 модуля. Если необходимо охлаждение только воды, то включается процесс прокачки воды через секцию 1 модуля. Если необходимо охлаждение только масла, то включается процесс охлаждения теплоносителя через секцию 3 модуля.

Выбор аппаратного обеспечения (технологических датчиков) осуществляется с учетом следующих критериев:

1) элементы аппаратного обеспечения должны надежно функционировать в диапазоне рабочих температур от  $-40$  до  $+85$  °С;

2) питание – от бортовой сети тепловоза напряжением ( $75 \pm 20$ ) В;

3) потребляемая мощность всей системой – не более 30 Вт;

4) время установления рабочего режима – не более 1 ч;

5) невозможность непосредственного контакта температурных датчиков с измеряемой средой.

С учетом вышеперечисленных требований для реализации устройства контроля и управления системой охлаждения выбран контроллер-конструктор LDM-SAM7X128 фирмы-производителя Ldm-systems (РФ). Для замера температуры выбран бесконтактный термодатчик ES1B компании Omron, отличительной особенностью которого является высокая чувствительность и точность измерения (погрешность измерения 2–4 %) при расстоянии от объекта до 1,5 см.

Блок управления исполнительными органами (агрегатами) реализован в виде девяти модулей гальванической развязки 70G-ODC5A фирмы Grayhill и монтажной панель серии МРВ-16 для их установки.

ЖКИ и клавиатура были заменены на единый элемент – панель оператора АТ71 (ФРГ).

Функциональная схема диагностической системы дизеля тепловоза приведена на рис. 2.

Разработка программного обеспечения для контроллера-конструктора велась с использованием компилятора IAR C для микроконтроллеров фирмы Atmel в среде IAR Embedded Workbench. При написании программного обеспечения использовался модульный принцип построения программ, т.е. каждая задача реализуется в отдельном модуле и подключается при необходимости.

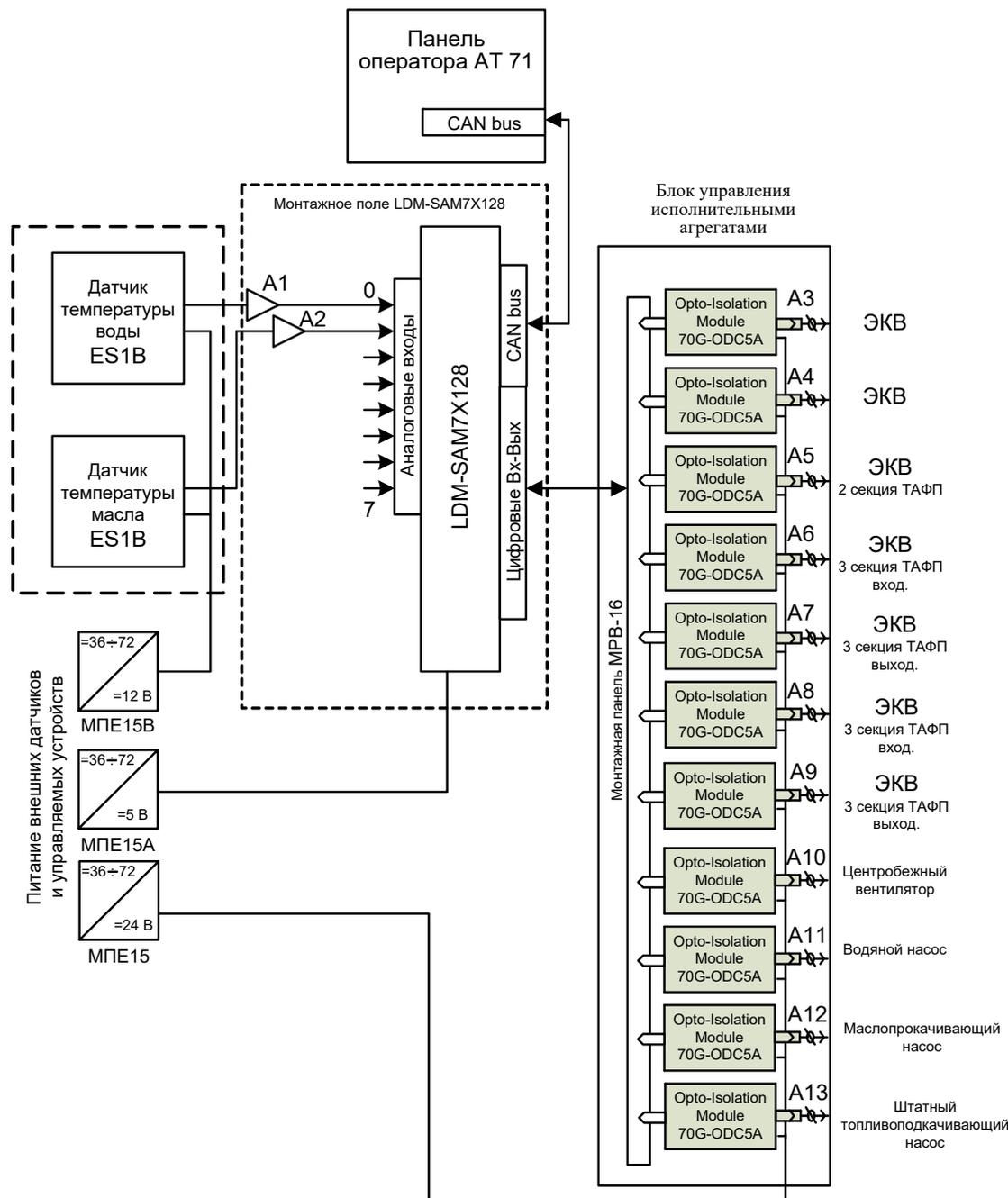


Рис. 2. Функциональная схема АС оптимизации режимов работы системы охлаждения тепловозного дизеля

Программное обеспечение состоит из шести модулей:

- 1) модуль ввода сигналов от датчиков;
- 2) модуль отображения результатов измерений температуры теплоносителей;
- 3) модуль выбора режима прогрева;
- 4) модуль создания управляющего воздействия на блок исполнительных агрегатов;
- 5) составления отчетов;
- 6) модуль сервисной программы.

Контроль показателей качества продукции с помощью современных средств измерения, включая лазерные, инфракрасные, волоконно-оптические датчики и устройства, обеспечит высокое качество, надежность, безопасность работы силового оборудования. Повышение качества за счет импортозамещения датчиков путем внедрения точных, надежных и долговечных приборов железнодорожного транспорта, обеспечение взаимозаменяемости и кооперирования производства невозможны без развития инструментов качества – метрологии, стандартизации, сертификации (МСС) –

и постоянного совершенствования техники измерений. Неопределенности в результате измерения могут быть сгруппированы в две категории в зависимости от способа оценки их численных значений: 1-я категория состоит из **случайных ошибок**, появляющихся из непредсказуемых изменений, которые оказывают влияние на величину; 2-я категория состоит из **систематических ошибок**. Важно знать **точность** и **стабильность** измерительных инструментов, **погрешность** измерения для того, чтобы сделать правильный выбор. Точность измерений – характеристика **качества измерений**, отражающая близость к нулю погрешностей их результатов. Для контроля точных процессов производства и повышения качества машин и других изделий необходимо не только непрерывно повышать точность, производительность и надежность средств измерения, но и правильно применять и систематически проверять средства измерения в процессе эксплуатации. Ошибочные результаты измерения из-за некачественного выполнения собственно измерений столь же часты, как и при применении неточных средств измерения – возникает **необнаруженный брак**, который приводит к браку на последующих этапах процесса производства, к снижению качества изделий, их точности, надежности и долговечности.

Системы контроля, диагностики и телемеханики для ОАО «РЖД» изготавливает ФГУП «Старт»: отечественные датчики давления и блоки питания, предназначенные для работы в системах контроля и управления технологическими процессами и т.д., являются основой в импортозамещении.

Основным техническим базисом для проведения контроля параметров элементов системы технологического оборудования (дизеля) являются информационно-измерительные системы, представляющие совокупность различного типа датчиков и устройств, объединяемых в одно целое – систему контроля на основе единого метрологического, информационного и программного обеспечения и обладающие необходимой для получения достоверных результатов степенью системной совместимости друг с другом.

Сбор информации может осуществляться с помощью устройств контроля, которые подразделяются:

- 1) на датчики непосредственного получения информации, например, концевые выключатели и сигнализаторы предельных значений и т.д.;
- 2) измерительные функциональные преобразователи (ФП) – датчики, например, преобразователи параметров измерений, преобразователи видов сигналов и т.д.

Датчик преобразует измеренную величину в отображаемый сигнал, а преобразователь – отображаемый сигнал в выходной, который в сопрягаемых устройствах единой измерительной системы является одновременно и принятым унифицированным сигналом. Преобразование в требуемый унифицированный сигнал может происходить в несколько ступеней. При этом удлиняется измерительная цепь и увеличивается количество возможных источников помех. Применение инвариантных волоконно-оптических измерительных ФП (датчиков) позволит повысить точность, стабильность измерений. Ввод результатов измерений в систему контроля и диагностики может производиться непрерывно или периодически с постоянной или переменной частотой. Рассмотрим датчики и устройства для систем контроля и диагностики параметров подвижного состава (ПС):

1. **Профилометр тормозных дисков** – использован **бесконтактный способ** регистрации профиля с помощью **лазерного датчика** и сканирующего устройства для: 1.1. Получение информации о параметрах профиля рабочей поверхности тормозных дисков железнодорожного колеса. 1.2. Снятие и анализ полного профиля тормозных дисков. 1.3. Визуализация на дисплее совмещенных графических изображений фактического и нового профилей тормозных дисков колеса. 1.4. Поддержка базы данных износа.

2. **Лазерные триангуляционные датчики**, предназначенные для бесконтактного измерения, контроля и диагностики: 2.1. Положения, размеров, профиля поверхности, деформаций, вибраций и т.д. 2.2. Измерения уровня жидкостей. Серия включает четыре модельных ряда: 1. РФ603 – универсальные датчики с рабочим диапазоном от 2 до 1250 мм; 2. РФ603HS – быстродействующие датчики; 3. РФ600 – датчики с увеличенным базовым расстоянием и большим диапазоном измерений; 4. РФ605 – малогабаритные датчики.

3. **Датчики давления** – предназначенные для контроля физических параметров в зависимости от давления измеряемой среды (жидкости – вода, масло, газ). В датчиках давление измеряемой среды преобразуется в унифицированный пневматический, электрический сигналы или цифровой код. Основными отличиями одних приборов от других являются пределы измерений, динамические и частотные диапазоны, точность регистрации давления, допустимые условия эксплуатации, массогабаритные характеристики, которые зависят от принципа преобразования давления в электрический сигнал:

тензометрический, пьезорезистивный, емкостный, индуктивный, резонансный, пьезоэлектрический и другие [1–5, 8].

4. Датчики и устройства контроля температуры фотонные и селективные, бесконтактные и быстродействующие типа ИРТ [1–5], внедренные на предприятиях машиностроения.

Реализация стандарта IEEE1451/4 в системе ИСО [5] позволит отказаться от традиционной практики учета использования датчиков, а также существенно снизить приходящиеся на один канал удельные затраты, связанные со сбором данных, их проверкой и анализом в многоканальных испытательных системах, применяющихся в промышленных и лабораторных условиях [8].

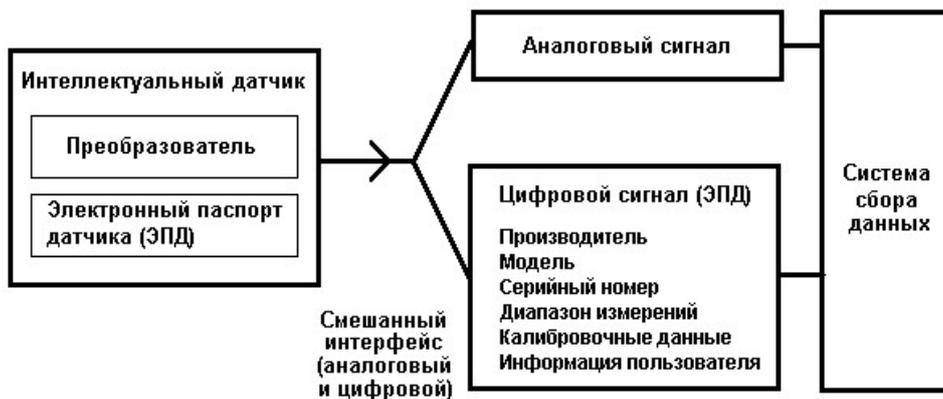


Рис. 3. Смешанный интерфейс интеллектуальных TEDS-датчиков

Стандартом IEEE 1451.4 определен следующий состав содержащейся в спецификации TEDS информации: Постоянная память (ПЗУ): идентификатор, код модели, серийный номер, дата выпуска. Перепрограммируемая память (ППЗУ): калибровочные данные (чувствительность), единицы измерения, эталонная частота, дата калибровки, код местоположения датчика. Реализация системного подхода с TEDS (ЭПД) дает следующие преимущества. Раньше настройка систем сбора данных требовала ручного ввода параметров датчика, таких как схема подключения, диапазон и чувствительность, или предварительного прописывания всех этих данных в программе. Эти данные использовались для математического преобразования исходных показаний датчика в отмасштабированные технические единицы. Система, оборудованная интеллектуальным датчиком, автоматизирует этот процесс, считывая его параметры по цифровому каналу с чипа ЭПД. Спецификация TEDS позволяет реализовать автоматическое конфигурирование датчика и упростить его согласование с другой электронной аппаратурой, так как вся информация о датчике хранится в TEDS-памяти встроенной микросхемы, то отпадает необходимость в создании отдельной базы данных, предназначенной для хранения калибровочной информации.

Текущие калибровочные данные загружаются в TEDS-память (ППЗУ) встроенной микросхемы при калибровке датчика. В процессе развертывания обычной системы с множеством датчиков значительная доля затрачиваемого времени приходится на сопоставление серийных номеров датчиков с номерами соединительных кабелей и на проверку правильности всех соединений. По мере возрастания числа каналов возрастает и число ошибок. Датчики TEDS сами определяют себя в системе, не нужно вручную следить за тем, к какому каналу подключен тот или иной датчик и это похоже на технологию Plug&Play, применяемую в компьютерной технике. Интеллектуальный узел самостоятельно определит факт замены датчика и автоматически отрегулирует все необходимые характеристики (автоматическое конфигурирование). Датчики также могут следить за своим расписанием калибровки. Поскольку электронный паспорт датчика хранит информацию о дате калибровки и сроке ее действия, он может сообщать системе о необходимости повторной калибровки. При проведении калибровки вы можете занести новые данные о калибровке и сроке действия назад в микросхему электронного паспорта датчика.

### Заключение

В ходе разработки диагностической системы оптимизации режимов работы системы охлаждения дизеля тепловоза были решены задачи:

– при монтаже обеспечена сохранность механической составляющей тепловоза (что является одним из главных требований ОАО «РЖД» при модернизации элементов и систем подвижного состава – ПС);

– применение методов идентификации тепловых параметров в режимах охлаждения силовых установок тепловозов позволило эффективно решить задачу автоматизации охлаждения тепловозов и повысить надежность.

Предлагаемое научное и техническое решение позволит снизить время работы силовых тяговых установок тепловозов, получить экономию топлива в пределах 5–6 % и увеличить ресурс и отказоустойчивость элементов силовой установки.

Предлагаемый алгоритм и методы диагностирования позволяют повысить надежность силового оборудования в составе ПС скоростной транспортной системы ОАО «РЖД».

Диагностическая система, оборудованная интеллектуальным датчиком, автоматизирует этот процесс, считывая его параметры по цифровому каналу с чипа ЭПД. Спецификация TEDS позволяет реализовать автоматическое конфигурирование датчика и упростить его согласование с другой электронной аппаратурой. Вся информация о датчике хранится в TEDS-памяти встроенной микросхемы, отпадает необходимость в создании отдельной базы данных для хранения калибровочной информации.

### Список литературы

1. Перевертов В. П., Бочаров Ю. А., Маркушин М. Е. Управление кузнечными машинами в ГПС : монография. Куйбышев, 1986. 160 с.
2. Перевертов В. П. Качество управления гибкими технологиями : монография. Самара : СамГУПС, 2019. 270 с.
3. Перевертов В. П. Материаловедение и гибкие технологии : учебник. Самара : СамГУПС, 2020. 280 с.
4. Перевертов В. П. Диагностика и управление кузнечными машинами в гибких производственных системах : монография. Самара : СамГУПС, 2021. 291 с.
5. Перевертов В. П. Метрология. Стандартизация. Сертификация : учебник. Самара : СамГУПС, 2024. 280 с.
6. Пат. РФ 69929, МПК F02N17/06. Устройство для поддержания систем двигателей внутреннего сгорания в прогретом и безотказном предпусковом состоянии / Носырев Д. Я., Чертыковцева Н. В., Пирогов В. М. № 2007128727 ; заявл. 25.07.2007 ; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1. 2008.
7. Чертыковцева Н. В., Перевертов В. П., Иванов А. В. Программно-аппаратный комплекс оптимизации режимов работы системы охлаждения дизеля тепловоза // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 1. С. 139–143.
8. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации : учебник. М. : НИЦ ИНФРА-М, 2023. 365 с.

### References

1. Perevertov V.P., Bocharov Yu.A., Markushin M.E. *Upravlenie kuznechnymi mashinami v GPS: monografiya = Management of forging machines in GPS : monograph*. Kuybyshev, 1986:160. (In Russ.)
2. Perevertov V.P. *Kachestvo upravleniya gibkimi tekhnologiyami: monografiya = Quality of management by flexible technologies : monograph*. Samara: SamGUPS, 2019:270. (In Russ.)
3. Perevertov V.P. *Materiialovedenie i gibkie tekhnologii: uchebnik = Materials science and flexible technologies : textbook*. Samara: SamGUPS, 2020:280. (In Russ.)
4. Perevertov V.P. *Diagnostika i upravlenie kuznechnymi mashinami v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh: monografiya = Diagnostics and control of forging machines in flexible production systems : monograph*. Samara: SamGUPS, 2021:291. (In Russ.)
5. Perevertov V.P. *Metrologiya. Standartizatsiya. Sertifikatsiya: uchebnik = Metrology. Standardization. Certification : textbook*. Samara: SamGUPS, 2024:280. (In Russ.)
6. Patent RF 69929, MPK F02N17/06. *Ustroystvo dlya podderzhaniya sistem dvigateley vnutrennego sgoraniya v pro-gretem i bezotkaznom predpuskovom sostoyanii = A device for maintaining internal combustion engine systems in a warmed up and trouble-free pre-start state*. Nesyrev D.Ya., Chertykovtseva N.V., Pirogov V.M. № 2007128727; appl. 25.07.2007; publ. 10.01.2008, Bull. № 1. 2008. (In Russ.)
7. Chertykovtseva N.V., Perevertov V.P., Ivanov A.V. Hardware and software complex for optimizing the operating modes of the diesel locomotive cooling system. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013;1:139–143. (In Russ.)
8. Shishov O.V. *Programmiruemye kontrollery v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii: uchebnik = Programmable controllers in industrial automation systems : textbook*. Moscow: NITs INFRA-M, 2023:365. (In Russ.)

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

**Валерий Петрович Перевертов**

кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры вагонного хозяйства  
и наземных транспортных комплексов,  
Приволжский государственный  
университет путей сообщения  
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В)  
E-mail: vpervertov@yandex.ru

**Николай Кондратьевич Юрков**

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

**Наталья Валерьевна Чертыковцева**

доцент, заместитель директора НОЦ «Передовая  
медицинская инженерная школа»,  
Самарский государственный  
медицинский университет  
(Россия, г. Самара, ул. Чапаевская, 89)  
E-mail: pmish@samsmu.ru

**Вера Николаевна Новикова**

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

**Николай Андреевич Кузин**

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

**Valeriy P. Perevertov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
professor of the sub-department of carriage industry  
and ground transport complexes,  
Volga State Transport University  
(2V Svobody street, Samara, Russia)

**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)

**Natalia V. Chertykovtseva**

Associate professor, deputy director  
of the Scientific and Educational Center  
"Advanced Medical Engineering School",  
Samara State Medical University  
(89 Chapaevskaya street, Samara, Russia)

**Vera N. Novikova**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of land transport and technological facilities,  
Volga State Transport University  
(2V Svobody street, Samara, Russia)

**Nikolai A. Kuzin**

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 04.05.2025**

УДК 343.326

doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-12

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СЛУЧАЕВ ПРОНИКНОВЕНИЯ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ И ДИВЕРСИОННЫХ ГРУПП

**А. И. Годунов<sup>1</sup>, М. В. Ерофеев<sup>2</sup>, А. Г. Избасов<sup>3</sup>, А. М. Мухамбетов<sup>4</sup>, Н. К. Юрков<sup>5</sup>**

<sup>1,5</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>3,4</sup> Военный институт сил воздушной обороны, Актобе, Казахстан

<sup>1</sup> avitelpgu@mail.ru, <sup>2</sup> penza.vamto.mil.ru, <sup>3</sup> suimbayeva@internet.ru, <sup>4</sup> iag1973@mail.ru, <sup>5</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема обеспечения безопасности функционирования сложных систем за счет предупреждения случаев проникновения в них террористических и диверсионных групп с целью совершения преступлений террористической и экстремистской направленности с использованием малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (МБЛА). *Материалы и методы.* Радиоуправляемые МБЛА в настоящее время становятся все более технологичными и доступными для массового покупателя устройствами. При этом для многих существующих объектов они представляют повышенную опасность. МБЛА непрерывно совершенствуются и обретают больше возможностей. У них увеличивается время работы от аккумулятора, растет грузоподъемность, дальность управления с пульта и другие важные параметры. Все это способствует расширению перечня угроз, исходящих от беспилотников. *Результаты и выводы.* Проведенный анализ возможностей МБЛА показал необходимость разработки способов обнаружения и борьбы с ними.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, террористический акт, мультикоптер

**Для цитирования:** Годунов А. И., Ерофеев М. В., Избасов А. Г., Мухамбетов А. М., Юрков Н. К. Методы и средства контроля случаев проникновения малых беспилотных летательных аппаратов террористических и диверсионных групп // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 109–118. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-12

### METHODS AND MEANS OF MONITORING CASES OF PENETRATION OF SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLES BY TERRORIST AND SABOTAGE GROUPS

**A.I. Godunov<sup>1</sup>, M.V. Erofeev<sup>2</sup>, A.G. Izbasov<sup>3</sup>, A.M. Mukhambetov<sup>4</sup>, N.K. Yurkov<sup>5</sup>**

<sup>1,5</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>3,4</sup> Military Institute of Air Defense Forces, Aktobe, Kazakhstan

<sup>1</sup> avitelpgu@mail.ru, <sup>2</sup> penza.vamto.mil.ru, <sup>3</sup> suimbayeva@internet.ru, <sup>4</sup> iag1973@mail.ru, <sup>5</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Abstract.** *Background.* This article considers the problem of ensuring the safety of complex systems by preventing cases of penetration of terrorist and sabotage groups into them in order to commit terrorist and extremist crimes

using small unmanned aerial vehicles (SUVs). *Materials and methods.* Radio-controlled SUVs are currently becoming more and more technologically advanced and affordable devices for the mass buyer. At the same time, they pose an increased danger to many existing objects. SUVs are constantly being improved and gaining more capabilities. They have increased battery life, increased payload, control range from the remote control and other important parameters. All this contributes to the expansion of the list of threats emanating from drones. *Results and conclusions.* The conducted analysis of the capabilities of the MUAV showed the need to develop methods for detecting and combating them.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, terrorist attack, multicopter

**For citation:** Godunov A.I., Erofeev M.V., Izbasov A.G., Mukhambetov A.M., Yurkov N.K. Methods and means of monitoring cases of penetration of small unmanned aerial vehicles by terrorist and sabotage groups. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):109–118. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-12

В настоящее время пропаганда терроризма и экстремизма выходит на новый критический уровень своего разнообразия и вызывает различные степени напряженности во всем мире. Причинами такого взрыва проявлений терроризма и экстремизма являются нестабильная обстановка в обществе многих государств, связанная с ухудшением положения дел в образовании, большим разрывом социального неравенства и пропаганда в социальных сетях на деньги зарубежных «доброжелателей демократии», а также опасная миграционная политика, обостряющая проблему национализма.

Из средств массовой информации прослеживается тенденция к наибольшему проявлению терроризма и экстремизма среди подростков и молодежи. Кроме причин, перечисленных выше, на них могут повлиять как родители с радикальными взглядами, так и преподаватели или тренеры каких-либо секций, где занимаются молодые люди. Отсутствие независимого мышления у молодых людей и чрезмерная чувствительность, которая у них обычно выше нормы, вызывает катастрофические ситуации, правонарушения и преступления против других людей с проявлением терроризма и экстремизма, что влечет за собой не только административное наказание, но и уголовное (рис. 1) [1].



Рис. 1. Рост преступлений террористического характера и экстремистской направленности

Рассмотрим основные термины террористических и диверсионных групп.

Террористическая группа – это группа лиц, объединившихся в целях осуществления террористической деятельности.

Диверсионная группа – подразделение, используемое для диверсий в тылу противника, с целью дезорганизации тыловых учреждений, уничтожения или временного выведения из строя важнейших промышленных предприятий, военных объектов и т.д.

Основные причины совершения террористических актов заключаются:

- в нападении на гражданина с целью причинения ему вреда здоровью, угрозу убийства, убийства или таких же деяний в отношении двух и более людей какой-либо социальной группы;
- устрашении какой-либо социальной группы по различным мотивам политической, идеологической, расовой, национальной или религиозной ненависти, или вражды;

– совершении события, которое станет объектом массового внимания и мирового страха – террорифобии;

– манипуляции на выбор какого-нибудь предложения или на его аннулирование

Анализ причин совершения террористических актов позволяет выработать алгоритм противодействия им, заключающийся в следующем:

– предупреждение терроризма, в том числе выявление и устранение причин, способствующих совершению террористических актов (профилактика терроризма);

– силовое противодействие, включающее в себя выявление, предупреждение, пресечение, раскрытие и расследование террористического акта (борьба с терроризмом);

– минимизацию и (или) ликвидацию последствий проявлений терроризма [1].

Так, например, для охраны и обороны объектов от вышеперечисленных угроз, а также от проникновения террористических и диверсионных групп оборудуются комплексы технических средств охраны.

Эффективность системы охраны объектов определяется:

$$P_{\text{Одтдг}} = P_{\text{вскр.}} \cdot P_{\text{дос.оц.}} \cdot P_{\text{дос.пер.}} \cdot P_{\text{БР}} \cdot P_{\text{СР}} \cdot P_{\text{ОЛС}} \cdot P_{\text{ВИ}},$$

где  $P_{\text{Одтдг}}$  – вероятность останова действия террористических и диверсионных групп;  $P_{\text{вскр.}}$  – вероятность вскрытия террористических и диверсионных групп;  $P_{\text{дос.оц.}}$  – вероятность достоверной оценки вскрытия действий террористических или диверсионных групп;  $P_{\text{дос.пер.}}$  – вероятность достоверной передачи сообщения о вскрытия действий террористических или диверсионных групп;  $P_{\text{БР}}$  – вероятность безотказной работы средств обнаружения и распознавания действий террористических или диверсионных групп;  $P_{\text{СР}}$  – вероятность своевременного развертывания служб безопасности в точке перехвата террористических и диверсионных групп;  $P_{\text{ОЛС}}$  – вероятность обученности личного состава служб безопасности в противодействии террористическим и диверсионным группам;  $P_{\text{ВИ}}$  – вероятность выигрышного исхода столкновения служб безопасности с террористическими или диверсионными группами. Вероятность эффективности  $P_{\text{эфф.}}$  рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{\text{эфф.}} = \prod_{i=1}^{N=7} P_i.$$

При  $P_i = 0,9$  получаем  $P_{\text{эфф.}} = 0,43$  соответственно: при  $P_i = 0,95 \rightarrow P_{\text{эфф.}} = 0,735$ ; при  $P_i = 0,98 \rightarrow P_{\text{эфф.}} = 0,886$ ; при  $P_i = 0,99 \rightarrow P_{\text{эфф.}} = 0,94$ .

Значения вероятности обнаружения для применяемых средств охраны целесообразно выбирать из ряда: 0,9; 0,95; 0,98; 0,99; 0,995; 0,998; 0,999 (при оценке с доверительной вероятностью 0,9) [2].

Итак, рассмотрены основные средства охраны от проникновения на территорию военного объекта террористических и диверсионных групп противника по суше. Но от проникновения и осуществления диверсии или террористической акции с применением МБЛА военный объект практически не защищен.

Сегодня большая часть беспилотных летательных аппаратов используется в военных целях и, прежде всего, для дистанционной разведки и нанесения ударов по целям. Закономерен и рост численности этих летательных аппаратов. В прогнозе Федерального управления авиации США, сделанного в 2019 г., отмечается, что через 15 лет только в США будет летать до 30 тысяч беспилотников (рис. 2).

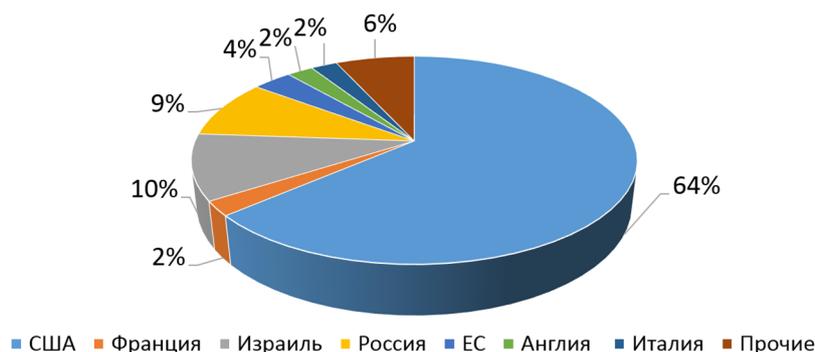


Рис. 2. Динамика роста распространения МБЛА в мире

Беспилотники имеют чрезвычайно мощную камеру, которая может различить людей и автомобили с высоты в несколько километров. Большинство из них имеют инфракрасную систему переднего обзора. Они способны в дневных и ночных условиях издалека увидеть объект и среагировать на излучающее тепло. Квадрокоптер – это МБЛА, который имеет четыре винтомоторные группы, необходимые для направленного движения в пространстве и совершения управления. Он относится к «мультикоптерам» – это МБЛА, приводимые в движение несколькими винтомоторными группами (регуляторы скорости, моторы и лопасти) от двух и более.

Количество винтомоторных групп определяет вид мультикоптера: бикоптеры, трикоптеры, квадрокоптеры, гексакоптеры, октокоптеры. Бикоптеры имеют две винтомоторные группы, у которых винты вращаются в разных направлениях, но имеет низкую управляемость и грузоподъемность.

Три винтомоторных группы имеет трикоптер, лучи корпуса которого расположены под углом горизонта на  $120^\circ$  между собой. Две винтомоторных группы обычно размещены на передних лучах (или луче, зависит от формы «Т» или «У» трикоптера), при этом вращаются в противоположных направлениях, чтобы уравновесить момент вращения между собой. Третья винтомоторная группа способна перемещаться в различные стороны на  $45^\circ$  сервоприводом, позволяющая управлять направлением движения дрона. Таким образом бикоптеры и трикоптеры самые дешевые и ненадежные конструкции мультикоптеров в целом, поэтому применяются в основном в игрушках.

С целью достижения больших высот и возможности нести большую полезную нагрузку используются гексакоптеры. Гексакоптеры – мультикоптерные устройства с использованием шести винтомоторных групп, которые хоть и дороже, но надежнее. Восьмилучевой мультикоптер – оптокоптер с использованием восьми винтомоторных групп, которые позволяют летать с одним или двумя неисправными винтами. Таким образом, они более надежные, чем все остальные виды мультикоптеров. Данные мультикоптеры необходимы для выполнения специальных задач, позволяющие повысить маневренность и стабилизацию в пространстве, а также увеличить массу полезной нагрузки.

Основа функционирования всех видов мультикоптеров, перечисленных выше в самом деле идентичный и позволяет быстро освоить операторами террористических и диверсионных групп методов управления. В основном для совершения преступлений используются квадрокоптеры. Управление квадрокоптером с целью совершения террористических и диверсионных актов очень просто и заключается в использовании стиков на пульте управления, как у любой управляемой игрушки из нашего детства. При этом управление винтомоторными группами осуществляется контроллером, размещенным на силовой раме квадрокоптера, винты, двигаясь в противоположном направлении, обеспечивают движение в пространстве, при этом хвостовой винт (по вертолетному типу) не нужен.

Современные мультикоптеры используют бесколлекторные электродвигатели и литий-полимерные аккумуляторы в качестве источника энергии. Это предполагает определенные ограничения в их полетных характеристиках: типичная масса мультикоптера составляет от 1 до 4 кг при времени полета от 10 до 30 мин (30–50 мин у уникальных единичных экземпляров). Полезный груз мультикоптеров среднего размера составляет от 500 г до 2–3 кг, что позволяет поднять в воздух небольшую фото- или видеокамеру. Существуют и достаточно крупные модели мультикоптеров с 6–8 роторами (гекса- и октокоптерами), способные поднять в воздух груз массой до 20–30 кг. Для увеличения грузоподъемности применяют соосное расположение несущих роторов, что в случае гексакоптера, например, дает 12 моторов и 12 пропеллеров, расположенных попарно на шести несущих лучах. Скорость полета мультикоптера может варьироваться от нуля (неподвижное висение в точке) до 100–110 км/ч. Запас энергии батарей позволяет отдельным моделям улетать на расстояние до 7–12 км. На практике же радиус действия (максимальное расстояние, на которое они способны улететь с последующим возвратом в точку взлета) обычно ограничен прямой видимостью (100–200 м при ручном управлении) либо дальностью действия аппаратуры радиуправления и видеосвязи (технология, позволяющая передавать видео- и аудиосигнал в реальном времени с высоким качеством) [3].

Эти ограничения приводят к тому, что мультикоптеры обычно используются как аппараты «ближнего радиуса действия»: для любительских полетов недалеко от себя, для фото- и видеосъемки близко расположенных объектов и т.д. Для сравнения: беспилотные самолеты с аккумулятором аналогичной емкости могут улетать на 10–15 км при высоте полета 1–2 км [3].

Радиуправляемые дроны сегодня становятся все более технологичными и доступными для массового покупателя устройствами. При этом для многих существующих объектов они представляют повышенную опасность. МБЛА непрерывно совершенствуются и обретают больше возможностей. У них увеличивается время работы от аккумулятора, растет грузоподъемность, дальность

управления с пульта и другие важные параметры. Все это способствует расширению перечня угроз, исходящих от беспилотников.

Таким образом, простота управления МБЛА и доступность в их приобретении членами террористических и диверсионных групп повышает угрозу их использованию в совершении противоправных действий. Только отлаженная система защиты от дронов способна предотвратить следующие опасности, которые могут исходить от МБЛА, использующихся в совершении террористических и диверсионных атаках [2–6]:

1) опасность атаки МБЛА террористических и диверсионных групп, так как МБЛА мультикоптерного типа способны нести до 30 кг самодельных взрывчатых устройств, применение которых несет угрозу убийства или нанесения вреда здоровью в отношении двух и более людей какой-либо социальной группы или сообщества;

2) использование МБЛА террористических и диверсионных групп вблизи аэропортов создает опасность для взлетающего и приземляющегося авиационного транспорта, а также пассажирам, находящимся на территории аэропортов;

3) использование МБЛА террористическими и диверсионными группами обеспечивает им анонимность, которая связана с особенностями управления МБЛА на большие расстояния и из укрытий, что позволяет безнаказанно использовать для иллегальных операций и преступлений;

4) использование МБЛА террористическими и диверсионными группами для посягательства на приватность, с целью последующего шантажа или планирования опасных атак;

5) опасность радиоактивной, биологической и бактериологической атаки МБЛА террористическими и диверсионными группами, на основе доставки контейнеров или в виде сельскохозяйственных МБЛА с емкостями;

6) опасность МБЛА террористическими и диверсионными группами от их аккумуляторных батарей, которые специально перегружая работу винтомоторной группы могут вызвать, перегрев аккумуляторных батарей и возгорание.

Таким образом, возникает необходимость систематизировать сферу деятельности МБЛА, связанную с их полетами, т.е. радиоуправляемых МБЛА самолетного, вертолетного и коптерного типа (например, квадрокоптера).

В настоящее время для использования МБЛА более 150 г необходимо поставить их на учет в Росавиации и получить разрешение на вылет. Но в Интернете можно получить все комплектующие для сбора МБЛА и до их регистрации использовать для проведения террористических и диверсионных актов.

Таким образом, на примере основных характеристик квадрокоптера (табл. 1) можно сделать вывод, что он может оказать опасное внешнее воздействие на важные объекты с целью проведения террористических и диверсионных актов, тем более вербовка производится на сайтах Интернета.

Таблица 1

Характеристики подавляющего большинства квадрокоптеров

Наименование характеристики	Показатели
Максимальная скорость горизонтального полета	до 16 м/с
Скорость вертикального взлета	5 м/с
Скорость снижения	3 м/с
Дальность полета	1000 м
Высота полета	6000 м
Время полета	60 мин
Несущая способность	5 кг
Рабочая частота	2,4 ГГц

Уже невозможно себе представить проведение боевых действий без применения МБЛА и БЛА различных видов и назначений. Максимально используются на линии боевого столкновения и на глубину до 10 км квадрокоптеры – FPV-дроны. Массированное применение таких МБЛА бывает определяющим в исходе проведения боевых действий. Таким образом, FPV-дроны эффективно применяются на малой высоте с малой площадью рассеивания из-за незначительных габаритных размеров. Борьбу против них можно осуществлять с помощью применения средств радиоэлектронной борьбы, но существуют программные системы управления и системы управления по кабелю (провода и

оптоволокну). FPV-дроны на коротких дистанциях можно сбить дробью из дробовиков и из стрелкового оружия создавая «заслон» направлению движения МБЛА.

МБЛА самолетного типа хоть и меньше встречаются на линии боевого столкновения, могут быть очень малых размеров. Так, при длине менее 1 м, высоте полета до 100 м, весом до 2 кг с массой полезной нагрузки до 0,5 кг МБЛА Dragon Eye считается «сверхмалым сборно-модульным самолетиком» (рис. 3).



Рис. 3. МБЛА Dragon Eye

Таким образом, МБЛА Dragon Eye необходим для использования на малой высоте в интересах морской пехоты для наблюдения за полем боя.

С уменьшением размеров микроэлектроники на нанoeлектронику позволило уменьшить габаритные размеры МБЛА и вес до 35 г (скорость составила 22,5 км/ч, дальность до 2 км, предельное время полета до 25 мин) – это беспилотник компании FLIR Systems.

Компания приступила к поставкам в армию США комплектов индивидуальных систем воздушной разведки FLIR PD – 100 Black Hornet 3, которые могут передавать видеоизображения на несколько автомобилей с целью выполнения боевых задач, размещенных в них личным составом (рис. 4) [4].



Рис. 4. Беспилотник Black Hornet

За последние 10 лет выросло количество предприятий, занимающихся МБЛА различных классов и размеров, в среднем их около 1100 компаний, из них более 70 компаний занимается производством МБЛА в России. Мировой рынок МБЛА к 2026 г. прогнозируется в 55,8 млрд долл. США, при этом ежегодный прирост составляет порядка 8 %.

В настоящее время нанотехнологии позволили на основе искусственного интеллекта, размещенного в МБЛА, определять правонарушителя по биометрии лица. МБЛА компании StratoEnergetics имеет телевизионную камеру, которая снимает все, что происходит у нее перед телевизионной камерой, а программное обеспечение позволяет обнаружить правонарушителя по биометрии лица и с помощью кумулятивного заряда весом 3 г его ликвидировать (рис. 5) [4].



Рис. 5 МБЛА компании StratoEnergetics

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что МБЛА для проведения террористических и диверсионных атак в настоящее время можно собрать за короткий срок и из различных комплектующих, поэтому необходимо вести учет продаж и покупок тех или иных комплектующих для их сбора до их регистрации в Росавиации. Появились опасные МБЛА, способные сами производить поиск по биометрическим данным человека и поражать, что побуждает разработать больше способов обнаружения и борьбы с ними для повышения национальной безопасности России. С учетом большого количества компаний, занимающихся МБЛА, необходимо их классифицировать для дальнейшего создания базы данных по массогабаритным характеристикам для успешного выбора в дальнейшем средств противодействия им (табл. 2) [2–7].

Таблица 2

Классификация БЛА и МБЛА по массогабаритным характеристикам

Класс	Характеристики БЛА и МБЛА	
1. Миниатюрные БЛА	М Б Л А	Слабая видимость в различных диапазонах электромагнитных и акустических волн, эффективно использовать в разведывательной деятельности как на открытом пространстве, так и в сильно урбанизированной застройке. Характеристики МБЛА: взлетная масса – до 1 кг, полезная нагрузка – до 0,5 кг, продолжительность полета – до 0,5 ч
2. Сверхмалые БЛА		Используется для наблюдения, целеуказания, корректировки стрельбы артиллерии, дозор местности, выполнение ударных задач, борьба с МБЛА противника и т.д. Характеристики МБЛА: взлетная масса от 1 до 10 кг, полезная нагрузка – от 0,5 до 20 кг, продолжительность полета – до 1,0 ч
3. Малые БЛА		Используется для наблюдения, целеуказания, корректировки стрельбы артиллерии, дозор местности, выполнение ударных задач, борьба с МБЛА противника, доставка грузов обеспечения и т.д. Характеристики МБЛА: данного класса имеют массу от 10 до 50 кг, полезная нагрузка от 20 до 30 кг, радиус действия – до 60 км, продолжительность полета до 5 часов. На МБЛА можно устанавливать РЛС мм диапазона. МБЛА самолетного типа требует наличия пусковой установки
4. Средние БЛА	Б Л	Используется для наблюдения, целеуказания, выполнение ударных задач, доставка грузов обеспечения и т.д. При этом может комплектоваться различным оборудованием для РЭБ и т.д., а также производить эвакуацию личного состава. Характеристики БЛА: масса может достигать до 0,25 т, полезная нагрузка – до 100 кг, скорость – не менее 200 км/ч, продолжительность полета – более 10 ч
5. Большие БЛА	А	Используется для наблюдения, выполнение ударных задач, доставка грузов обеспечения и т.д. При этом может комплектоваться специальным оборудованием. Характеристики БЛА: масса – более 0,25 т, полезная нагрузка – более 100 кг, скорость – более 200 км/ч, продолжительность полета – более 24 ч

Из анализа табл. 2 следует, что в настоящее время МБЛА террористических и диверсионных групп способны производить наблюдение, целеуказание, осуществлять корректировку стрельбы артиллерии, производить дозор местности и выполнение ударных задач, заменяя применение артиллерии, при этом осуществлять борьбу с МБЛА, производить доставку грузов в зависимости от массогабаритных размеров МБЛА до 50 кг на расстояния до 60 км.

Массогабаритные характеристики МБЛА террористических и диверсионных групп могут использовать различные модернизированные боеприпасы и самодельные взрывные устройства как на границе России, так и в глубине страны. Угрозы применения МБЛА террористических и диверсионных групп ощущают на себе приграничные территории с Украиной.

Из проведенного анализа современной литературы были выведены следующие термины, характерные для определения количества применяемых МБЛА, которыми могут воспользоваться террористические и диверсионные группы. «Группа МБЛА» – включает в свой состав от двух до девяти МБЛА, «Стая МБЛА» – включает в свой состав от девяти до тридцати МБЛА, «Рой МБЛА» – включает в свой состав от тридцати до ста МБЛА, «Большой рой МБЛА» – включает в свой состав более ста МБЛА. И можно только представить последствия применения террористическими или диверсионными группами «МБЛА камикадзе на искусственном интеллекте» (рис. 6) [4, 6, 8].



Рис. 6. Применение группы МБЛА и возможные последствия террористической атаки

В настоящее время в США проводятся исследования по применению роя МБЛА для огневого поражения тактического звена на переднем крае проведения боевых действий, подавления систем ПВО и уничтожения тыловых средств обеспечения. Таким образом, «Большой рой МБЛА», который включает в свой состав более ста МБЛА будет способен переломить ход боевых действий тактического подразделения. Элементы данных технологий могут быть использованы и террористическими и диверсионными группами, использующими в своих целях МБЛА. Необходимо разработать способы противодействия данным вызовам и оценить их на основе предложенной оценки эффективности системы охраны объектов от МБЛА террористических и диверсионных групп, приведенных в начале статьи.

Существующие средства и способы борьбы с МБЛА позволяют бороться с ними [8–12], но стоит другая проблема – обнаружение и обучение личного состава с использованием или без искусственного интеллекта.

В боевых действиях за последние годы выявлена необходимость внедрения автономного оружия для солдата и обучение эффективному его применению. Существующая «гуманная» тактика применения вооружения и военной техники любого назначения НАТОвскими «войсками» несет серьезные разрушения и потери среди мирного населения (4:1, т.е. из пяти погибших: четверо военные и один мирный житель), при том, что они «старались» избегать потерь мирного населения и даже отменяли запланированные налеты и операции. Быстрая интеграция искусственного интеллекта в вооружение приведет к большим потерям мирного населения, так как будут отсутствовать моральные принципы.

### Заключение

Проведенный анализ возможностей МБЛА показал необходимость применения существующих способов обнаружения и борьбы с ними, а также методов и средств обучения личного состава в противодействии МБЛА террористических и диверсионных групп. Введены новые термины по количеству используемых МБЛА террористическими и диверсионными группами. Рассмотрена проблема по предупреждению проникновения террористических и диверсионных групп с целью совершения преступлений террористической и экстремистской направленности с использованием МБЛА на основе предложенной оценки эффективности системы охраны объектов.

### Список литературы

1. Авакьян М. В., Болвачев М. А., Волчецкая Т. С., Осипова Е. В. Методические рекомендации по профилактике распространения идеологии терроризма и экстремизма. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2023. 44 с.
2. Анисимова И. А. Преступления террористической направленности: сравнительные аспекты : учеб. пособие / под ред. И. А. Анисимовой, В. А. Мазурова. Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2021. 122 с.
3. Адамов А. П., Адамова А. А., Герасимов Н. В. Анализ эксплуатации мультикоптеров с позиции надежности и безопасности // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 86–93.
4. Борщин Ю. Н., Шишков С. В., Колесников И. Б. [и др.] Место малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в классификации летательных аппаратов // Военное обозрение. 2020. № 2. С. 76–80.
5. Костин А. С. Классификация гражданских беспилотных летательных аппаратов и сферы их применения // Системный анализ и логистика. 2019. № 1. С. 70–80.
6. Моисеев В. С. Беспилотные летательные аппараты: отечественная история создания и современная классификация : препринт. Казань : Ред.-изд. центр «Школа», 2022. 40 с.
7. Калинин Г. Б. Классификация типов беспилотных воздушных судов в нормативно-правовом регулировании Российской Федерации // Вестник науки. 2024. Т. 4, № 11 (80). С. 1235–1241.

8. Шишков С. В., Чернов Е. А., Исаев Э. К. Анализ современных систем распознавания целей с использованием нейронных сетей // Радиопромышленность. 2011. № 4. С. 58–67.
9. Пат. 2601494 С1 Российская Федерация, МПК F41H 11/02, G01S 5/00. Способ определения координат летательных аппаратов на основе использования двух дирекционных углов и одного угла места / Искоркин Д. В., Шишков С. В., Терешин А. В. [и др.]; заявитель Федеральное государственное казенное военное учреждение высшего профессионального образования «Военная академия материально технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева». № 2015114889/11; заявл. 20.04.2015; опубл. 10.11.2016.
10. Пат. 2700107 С1 Российская Федерация, МПК F41H 11/02, G01S 13/86. Комплекс борьбы с беспилотными летательными аппаратами / Шишков С. В., Устинов Е. М., Барсуков В. А. [и др.]; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева». № 2018137613; заявл. 24.10.2018; опубл. 12.09.2019.
11. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность и терроризм : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2024. 308 с.
12. Годунов А. И., Куканов С. А., Суздальцев П. С. Навигационные элементы полета беспилотного летательного аппарата // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 104–111.

### References

1. Avak'yan M.V., Bolvachev M.A., Volchetskaya T.S., Osipova E.V. *Metodicheskie rekomendatsii po profilaktike rasprostraneniya ideologii terrorizma i ekstremizma = Methodological recommendations for the prevention of the spread of the ideology of terrorism and extremism*. Kaliningrad: Izd-vo BFU im. I. Kanta, 2023:44. (In Russ.)
2. Anisimova I.A. *Prestupleniya terroristicheskoy napravlenosti: sravnitel'nye aspekty: ucheb. posobie = Crimes of a terrorist orientation: comparative aspects : textbook*. Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2021:122. (In Russ.)
3. Adamov A.P., Adamova A.A., Gerasimov N.V. Analysis of multicopter operation from the perspective of reliability and safety. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):86–93. (In Russ.)
4. Borshchin Yu.N., Shishkov S.V., Kolesnikov I.B. et al. The place of small-sized unmanned aerial vehicles in the classification of aircraft. *Voennoe obozrenie = Military Review*. 2020;(2):76–80. (In Russ.)
5. Kostin A.S. Classification of civilian unmanned aerial vehicles and their applications. *Sistemnyy analiz i logistika = System analysis and logistics*. 2019;(1):70–80. (In Russ.)
6. Moiseev V.S. *Bespilotnye letatel'nye apparaty: otechestvennaya istoriya sozdaniya i sovremennaya klassifikatsiya: preprint = Unmanned aerial vehicles: the national history of creation and modern classification : preprint*. Kazan': Red.-izd. tsentr «Shkola», 2022:40. (In Russ.)
7. Kalinin G.B. Classification of types of unmanned aerial vehicles in the legal regulation of the Russian Federation. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*. 2024;4(11):1235–1241. (In Russ.)
8. 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.)
9. Patent 2601494 C1 Russian Federation, МПК F41H 11/02, G01S 5/00. *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. et al.; applicant Federal'noe gosudarstvennoe kazennoe voennoe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Voennaya akademiya material'no tekhnicheskogo obespecheniya imeni generala armii A.V. Khruleva». № 2015114889/11; appl. 20.04.2015; publ. 10.11.2016. (In Russ.)
10. Patent 2700107 C1 Russian Federation, МПК F41H 11/02, G01S 13/86. *Kompleks bor'by s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami = Complex for combating unmanned aerial vehicles*. Shishkov S.V., Ustinov E.M., Barsukov V.A. et al.; applicant Federal'noe gosudarstvennoe kazennoe voennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Voennaya akademiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya imeni generala armii A.V. Khruleva». № 2018137613; appl. 24.10.2018; publ. 12.09.2019. (In Russ.)
11. Severtsev N.A., Yurkov N.K. *Bezopasnost' i terrorizm: monografiya = Security and terrorism : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2024:308. (In Russ.)
12. Godunov A.I., Kukanov S.A., Suzdal'tsev P.S. Navigation elements of an unmanned aerial vehicle flight. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(3):104–111. (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

#### 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)

**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: penza.vamto.mil.ru

**Аскар Гадылшиевич Избасов**

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

**Асылбек Маратович Мухамбетов**

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

**Николай Кондратьевич Юрков**

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

**Mikhail V. Erofeev**

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

**Askar G. Izbasov**

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

**Asylbek M. Mukhambetov**

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

**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 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 01.05.2025**

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ИНДЕКСНЫМИ МЕТОДАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

**А. В. Маслобоев**

Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия  
Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия  
masloboev@iimm.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Исследование направлено на разработку подходов и методов информационной поддержки многокритериального принятия решений в задачах управления объектами природно-промышленных систем Арктической зоны России с целью обеспечения их экологической безопасности и устойчивого функционирования в условиях воздействия негативных факторов природного и техногенного характера. Региональные особенности и специфика хозяйственного освоения обуславливают уязвимость объектов, локализованных на территории данного региона, в плане возникновения неблагоприятных иницирующих событий различного генезиса, что требует выработки эффективных мер и стратегических решений, повышающих надежность и безопасность объектов существующей региональной инфраструктуры. Для обоснованного выбора мер противодействия актуальным угрозам в процессе управления необходимо проводить оценку и анализ вариантов решений по многим критериям. *Материалы и методы.* Единая методологическая база исследования включает общую теорию безопасности, методологию управления рисками и развивающуюся на современном этапе концепцию жизнеспособности сложных систем. Предлагаемый подход к многоуровневой интегральной оценке экологической безопасности территорий основан на совместном применении индексных методов количественного и качественного анализа разнородных показателей устойчивости экосистем и иерархическом агрегировании оценок. *Результаты и выводы.* Разработан модифицированный индикаторный метод, расширяющий возможности известных методик расчета интегрального показателя состояния экосистем в части учета качественных показателей и ситуационных факторов, их неравнозначности и антагонистичности, а также сохранения сбалансированности показателей. Метод основан на автоматической трансформации оценок в функции принадлежности и нечеткой свертки нормализованных показателей по уровням организационной иерархии. Метод позволяет количественно оценить степень воздействия объектов природно-промышленных систем на состояние устойчивости экосистем в условиях неполной определенности исходных данных и может быть использован для подготовки и реализации комплекса превентивных и реактивных мер по повышению экологической безопасности территорий при импактном мониторинге этих объектов.

**Ключевые слова:** природно-промышленная система, анализ устойчивости экосистем, управление, экологическая безопасность, многокритериальная оценка, нечеткий индексный метод, интегральный показатель

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2025-0054) и ИППЭС КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2025-0044).

**Для цитирования:** Маслобоев А. В. Особенности оценки экологической устойчивости природно-промышленных систем индексными методами с применением мягких вычислений // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 119–135. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-13

## ECOLOGICAL RESILIENCE ASSESSMENT FEATURES OF NATURAL-INDUSTRIAL SYSTEMS BY INDEX-BASED METHODS USING SOFT COMPUTING

**A. V. Masloboev**

Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Center  
"Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia  
Institute of North Industrial Ecology Problems of the Federal Research Center  
"Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia  
masloboev@iimm.ru

**Abstract. Background.** The study is aimed at developing approaches and methods for information support of multi-criteria decision-making in management problem-solving of natural-industrial system entities in the Arctic region of Russia in order to ensure their environmental safety and resilient operation under the influence of negative natural and man-made factors. Regional peculiarities and specific character of economic development condition on the vulnerability of entities localized in the territory of a given region in terms of the emergence of adverse triggering events of various genesis, necessitating the development of effective measures and policy decisions that enhance the reliability and safety of existing regional infrastructure entities. To make informed decisions and a reasonable choice of measures to counteract current threats when managing safety and resilience of ecosystems, the evaluation and analysis of alternative decisions based on multiple criteria should be carried out. *Materials and methods.* The unified methodological framework of our study includes the fundamentals of safety sciences, risk management methodology, and the state-of-the-art resilience concept of complex systems, as currently developing research area. The proposed approach to a multi-level integral estimation of environmental safety of territories is based on the combined use of index-based methods for quantitative and qualitative analysis of heterogeneous indicators of ecosystem resilience and hierarchical aggregation of the assessments. *Results and conclusions.* A modified index-based method, expanding the capabilities of existing methodologies for calculating the integral index of environmental conditions by incorporating qualitative indicators and situational factors, taking into account their unequal significance and antagonism, as well as maintaining the balance of indicators, has been developed. The method is based on the automatic transformation of estimates into membership functions and fuzzy convolution of the normalized indicators across levels of the organizational hierarchy. Proposed method allows for a quantitative assessment of the exposure degree of natural-industrial system entities on the state of ecosystem resilience under incompleteness and uncertainty of the raw data, and can be used to prepare and implement a set of preventive and reactive measures to improve the environmental safety of the territory when providing control and impact monitoring of these entities.

**Keywords:** natural-industrial system, ecosystem resilience analysis, management, environmental safety, multi-criteria assessment, index-based fuzzy method, integral performance criterion

**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-2025-0054) and Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS (project No. FMEZ-2025-0044).

**For citation:** Masloboev A.V. Ecological resilience assessment features of natural-industrial systems by index-based methods using soft computing. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):119–135. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-13

## Введение

Арктическая зона Российской Федерации (АЗ РФ) имеет стратегическое значение для обеспечения национальной безопасности и технологического суверенитета страны. Поэтому социально-экономическое и инфраструктурное развитие регионов АЗ РФ является одним из приоритетных направлений государственной политики. Большая часть территории АЗ РФ характеризуется неблагоприятными климатическими условиями, высокими экологическими рисками, труднодоступностью и, как следствие, ограниченным развитием инфраструктурной обеспеченности. Все это требует сфокусированного внимания к вопросам надежности и эффективности функционирования объектов как существующей инфраструктуры АЗ РФ, так и рационального планирования новых инфраструктурных проектов на этой территории. При этом необходимость решения всего комплекса возникающих в этой связи проблем и задач по обеспечению безопасности и устойчивости критических инфраструктур различного типа, в том числе природно-промышленных систем, обусловленных спецификой и региональными особенностями АЗ РФ, приобретает сегодня особую актуальность для арктических регионов.

Интенсификация климатической повестки, обусловившая включение «Основами государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года»<sup>1</sup> и «Стратегией развития АЗ РФ и обеспечения национальной безопасности до 2035 года»<sup>2</sup> широкого блока задач по сохранению биоразнообразия, обеспечению экологического благополучия и техносферной безопасности в число основных государственных императивов развития арктических регионов, наряду с утверждением «Национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу

<sup>1</sup> Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года : указ Президента РФ № 164 от 05.03.2020. URL: <http://www.scrf.gov.ru/media/files/file/W5JeWAnrAypIMIMHXFRX-EmQwLOUfoesZ.pdf>

<sup>2</sup> Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года : указ Президента РФ № 645 от 26.10. 2020. URL: <http://www.scrf.gov.ru/media/files/file/hcTiEHnCdn6TqRm5A677n5iE3yXLI93E.pdf>

до 2036 года»<sup>1</sup>, а также «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»<sup>2</sup>, безусловно, окажет непосредственное воздействие на промышленный кластер АЗ РФ и потребует как мониторинга влияния климатической политики на окружающую среду, так и разработки обоснованных мер и управленческих решений, повышающих экологическую безопасность и устойчивость объектов природно-промышленных систем АЗ РФ с учетом современных вызовов. Необходимость повышения экологической устойчивости Арктики в целом, включая АЗ РФ, снижения уровня угроз национальной и международной безопасности в данном регионе, обеспечения благоприятных условий для социально-экономического развития арктических территорий и надежного использования транспортной инфраструктуры Северного морского пути также отмечается и в Концепции внешней политики Российской Федерации<sup>3</sup>.

Любые стратегические решения в области индустриального освоения и развития АЗ РФ должны приниматься с учетом понимания базовых положений и принципов концепций устойчивости [1], экологической безопасности [2], ESG (Environmental, Social, and Corporate Governance – свод правил и стандартов бережного отношения бизнеса к природной среде, практик социальной ответственности и ответственного корпоративного управления), зеленой и низкоуглеродной экономики [3–6]. Для разработки таких управленческих решений должны проводиться междисциплинарные эколого-экономические исследования, задачами которых являются создание моделей потенциальных угроз экологической безопасности критически важных объектов региональных природно-промышленных систем АЗ РФ, превентивных мер по обеспечению экологической устойчивости данного класса систем, в том числе новых стандартов и подходов к классификации промышленных объектов по степени воздействия на окружающую среду, а также оценка системных рисков возникновения критических ситуаций природного и техногенного характера в этих системах. Для обоснованного выбора мер противодействия актуальным угрозам в процессе ситуационного управления и импактного мониторинга необходимо проводить анализ вариантов решений по многим критериям. В целях поддержки многокритериального принятия решений в области задач управления экологической безопасностью и устойчивым функционированием природно-промышленных систем АЗ РФ в настоящей работе предлагается подход к многоуровневой интегральной оценке экологической безопасности территорий, основанный на совместном применении индексных методов количественного и качественного анализа разнородных показателей устойчивости экосистем и иерархическом агрегировании нормализованных оценок показателей по уровням организационной иерархии.

### Материалы и методы

Управление экологической безопасностью объектов природно-промышленных систем представляет собой сложный многоэтапный процесс, по своей структуре распределенный и многофункциональный и в общем случае включающий в себя такие функции управления, как целеполагание, стратегическое планирование, оперативное управление, а также функции контроля, учета, мониторинга и координации. Для эффективной реализации каждой функции на каждом этапе необходимы средства информационно-аналитической поддержки принятия решений, адекватные решаемым задачам обеспечения экологической безопасности. Одной из важнейших задач в рамках этого процесса является оценка и анализ динамики показателей экологической безопасности с учетом влияния ситуационных факторов, результаты решения которой обеспечивают обоснованный выбор превентивных и реактивных мер по повышению устойчивости экосистем к воздействию угроз различной природы, а также вариативность сценариев управления критическими ситуациями, что позволяет оперативно реагировать на эти ситуации и оптимизировать управленческую деятельность в природоохранной сфере. Специфичность объектов природно-промышленных систем АЗ РФ во многом ограничивает возможности создания эффективных инструментов информационной поддержки управления ими на основе статистических методов и компьютерных технологий экспертных систем. В настоящее время перспективным для целей импактного мониторинга и индикаторного риск-анализа представляется использование нейросетевых моделей, нечеткой логики, технологий ситуационного управления и объяснимого искусственного интеллекта.

<sup>1</sup> О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года : указ Президента РФ № 309 от 07.05.2024. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/73986>

<sup>2</sup> Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента РФ № 145 от 28.02.2024. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/HHNazT11guvX9Y00yaFA4KkMWPYcWS8.pdf>

<sup>3</sup> Концепция внешней политики Российской Федерации : указ Президента РФ № 229 от 31.03.2023. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49090>

Принято выделять два подхода к обеспечению экологической безопасности в регионе: динамический и статический [7]. Динамический подход предполагает снижение негативного воздействия горнодобывающей, перерабатывающей и металлургической промышленности на человека, животный и растительный мир, почвы, недра, атмосферу, поверхностные и подземные воды, а также восстановление техногенно нарушенных территорий, акваторий и воздушного пространства. Статический подход заключается в недопущении хозяйственной деятельности, разрушающей природные ландшафты, объекты и комплексы, в создании особо охраняемых природных территорий, в разработке программ сохранения биоразнообразия для промышленных предприятий, в реализации эффективных мер и управленческих решений по обеспечению устойчивости экосистем. Индикаторная оценка состояния экосистем и анализ их чувствительности к техногенной нагрузке является неотъемлемой частью обоих подходов.

Современные методы оценки экологической безопасности и устойчивости территорий традиционным способом могут быть классифицированы на качественные, количественные и комбинированные [8], оперирующие качественными, количественными и приведенными к единой шкале измерений нормализованными оценками характеристик функционирования экосистем соответственно. Комбинированные методы, несмотря на наличие присущих им достоинств качественных и количественных подходов, могут оказаться более трудоемкими и дорогостоящими, по сравнению с отдельными представителями указанных классов методов.

Принятая в нашей стране методология оценки и анализа экологической безопасности и устойчивости природо-промышленных систем включает традиционные методы и подходы, сгруппированные по рассмотренным выше классам (рис. 1). Зарубежная систематизация методических инструментов, успешно используемых в практике управления экологическими рисками и устойчивостью сложных систем различной природы и масштаба, идеологически близка по целеполаганию отечественной методологии и согласуется с ней по существу содержания. Классификация методов, применяемых в зарубежных исследованиях вопросов экологической безопасности и устойчивости критически важных объектов и инфраструктур, приведена на рис. 2.

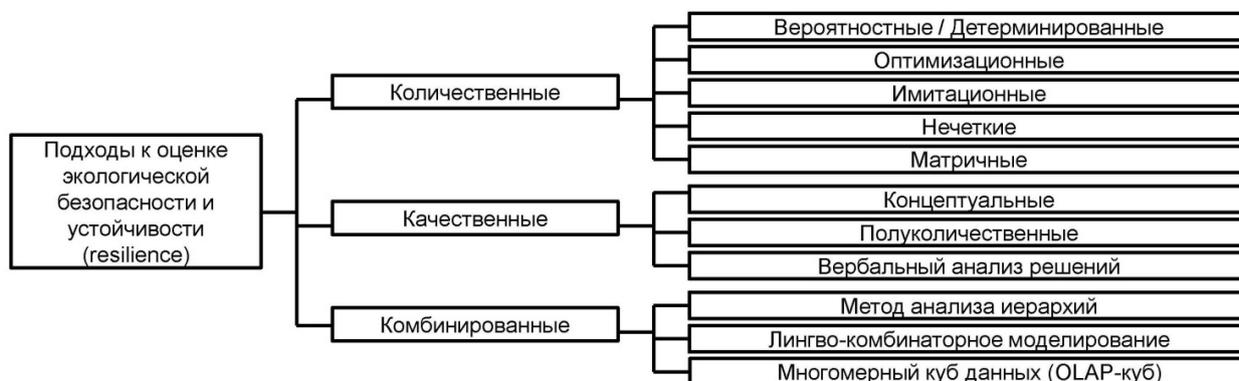


Рис. 1. Методы оценки и анализа экологической безопасности и устойчивости объектов природо-промышленных систем (отечественная классификация)



Рис. 2. Методы оценки и анализа экологической безопасности и устойчивости объектов природо-промышленных систем (зарубежная классификация)

Наиболее популярными с точки зрения наглядности и простоты применения на практике являются индексные методы, которые могут быть легко и гибко адаптированы под конкретные условия (контекст) задачи. Эти методы относятся к группе полуколичественных методов, что обеспечивает их применимость для оценки экологической безопасности и устойчивости как инженерно-технических, так и природо-промышленных систем, а также социально-экономических и критически значимых инфраструктурных объектов. Индексные методы основаны на формировании системы ключевых индикаторов, отражающих динамику состояния объектов, и оценке целевых показателей качества функционирования объектов в процессе их эксплуатации. Структура индексных методов учитывает весовые коэффициенты для показателей безопасности и устойчивости системы и опирается на количественные и качественные ретроспективные и оперативные данные о поведении системы до и после наступления иницирующих событий. Однако эффективность работы этих методов зависит от качества исходных данных, выбора подходящих индикаторов и их весов, а также от регулярного обновления и адаптации индикаторной системы оценки под изменяющиеся условия. В общем случае интегральный показатель состояния экологической безопасности и устойчивости вычисляется путем агрегирования отобранных индикаторов и выявленных (влияющие/способствующие) факторов с применением метода средневзвешенных оценок.

Для уменьшения неопределенности исходных данных и снижения зависимости результатов работы индексных методов измерения устойчивости экосистем от качества входной информации используются нечеткое моделирование и экспертные оценки [9]. Методы нечеткой оценки устойчивости позволяют на качественном уровне учитывать наблюдаемые и ненаблюдаемые факторы, оказывающие прямое или косвенное влияние на целевые показатели устойчивости системы (восстанавливаемость, адаптируемость и другие). При этом стоит отметить, что современные индексные методы с научно-методической точки зрения недостаточно разработаны в части определения и количественной оценки влияющих ситуационных факторов [10].

Среди известных индексных методов, получивших широкое применение для решения задач индикаторной оценки безопасности, устойчивости, жизнеспособности динамических систем, согласно исследованию [9], наибольшего внимания заслуживают следующие:

- Resilience Framework BRIC (Baseline Resilience Indicators for Communities), США;
- Resilience Framework P.E.O.P.L.E.S (Population and demographics, Environmental/Ecosystem, Organized governmental services, Physical infrastructure, Lifestyle and community competence, Economic development, Social-cultural capital), США;
- The Benchmark Resilience Tool (BRT), Новая Зеландия;
- Guidelines for Critical Infrastructures Resilience Evaluation ("Guidelines"/CIRE), Италия;
- The Critical Infrastructure Resilience Index (CIRI), Норвегия;
- Resilience Management/Measurement Index (RMI), США;
- Organizational Resilience Health Check (ORHC), Австралия;
- Resilience Analysis Grid (RAG), Дания;
- "Swiss Approach", Швейцария;
- Resilience Matrix-based Integral Estimation Approach (RMIEA), Россия;
- Resilience Multi-dimensional Data Cube (ROLAP-cube), Германия.

Перечисленные подходы, фреймворки и методические рекомендации, принципиально различающиеся лишь структурой и математическим аппаратом процедуры оценки, могут быть также успешно использованы для интегральной оценки экологической безопасности территорий и анализа устойчивости элементов природо-промышленных систем.

Одним из последних важнейших достижений в области исследования техногенного влияния критически важных и потенциально опасных объектов (тяжелой промышленности) на экологическую безопасность и биоразнообразие в нашей стране можно считать впервые разработанную в 2022–2023 гг. учеными Института систематики и экологии животных Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН) под руководством чл.-корр. РАН В. В. Глупова методику расчета интегрального показателя состояния экосистем (ИПСЭ)<sup>1</sup> в зоне воздействия объектов промышленных предприятий и ее апробацию на территории АЗ РФ, а также других регионов России.

ИПСЭ как индикатор промышленного влияния на окружающую среду был разработан для ПАО ГМК «Норильский никель» с целью оценить экологическую ситуацию в регионах присутствия

<sup>1</sup> В СО РАН разработали метод оценки состояния экосистем вблизи заводов. URL: <https://news.ecoindustry.ru/2023/11/v-so-ran-razrabotali-metod-otsenki-sostoyaniya-ekosistem-vblizi-zavodov>

компании, уровень и состояние биологического разнообразия флоры, фауны, почв и других элементов экосистем. В перспективе использование методики расчета ИПСЭ в качестве инструмента корпоративного управления воздействием промышленных зон на биоразнообразие окружающей среды, встроенного в систему обеспечения экологической безопасности, может быть рекомендовано Министерству природных ресурсов и экологии Российской Федерации как обязательное для оценки и анализа состояния окружающей среды в импактных зонах промышленных объектов. Это позволит не только осуществлять контроль и мониторинг негативных факторов техногенного воздействия и принимать своевременные меры по поддержанию устойчивости экосистем, но и отличать естественные процессы в сообществах живых организмов от изменений, вызванных влиянием этих антропогенных факторов, а также ставить четкие цели по сохранению биоразнообразия<sup>1</sup>.

Для расчета ИПСЭ проводится сбор информации о состоянии различных компонентов наземных и водных экосистем (видовое разнообразие, химические элементы и др.) как на территориях вокруг промышленных объектов, так и на контрольных (фоновых) полигонах, где экосистемы находятся в нормальном устойчивом состоянии, что определяется по таким параметрам (метрикам), как: индекс Бергера – Паркера; проективное покрытие, встречаемость; видовое богатство; индекс разнообразия Шеннона; индекс доминирования Симпсона; индекс выравненности Пиелу и т.д. При этом должны учитываться показатели по целому комплексу индикаторных групп и видов. Показатели контрольных полигонов принимаются за «норму», и поэтому ИПСЭ фоновых территорий априори считается равным единице. Собранные данные в импактных зонах промышленных предприятий сравниваются с контрольными показателями, в результате чего определяются отклонения от контрольных показателей, которое просчитывается для каждого индикатора в отдельности по каждой зоне воздействия: показатели зоны воздействия делятся на показатели фона, и получается коэффициент индикатора в этой зоне. Полученные коэффициенты суммируются и делятся на общее количество индикаторов, участвующих в рассмотрении. В итоге выводится ИПСЭ в зоне промышленного импакта дивизиона предприятия, представляющий собой средневзвешенное значение ИПСЭ во всех зонах воздействия с учетом ширины каждой зоны<sup>2</sup>.

ИПСЭ исследуемой зоны вычисляется по следующей формуле<sup>3</sup>:

$$IIES = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{IX_i}{IX_{i\text{фон}}} \right)}{n}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} IIES < 1: \text{потеря биоразнообразия в исследуемой зоне промышленного воздействия,} \\ IIES = 1: \text{соответствие состояния экосистем импактной зоны и контрольной,} \\ IIES > 1: \text{условный прирост биоразнообразия в исследуемой зоне,} \end{cases}$$

где  $IIES$  – интегральный показатель состояния экосистем;  $IX_i$  – среднее значение конкретного  $i$ -го показателя, полученное на определенной контрольной площадке (полигоне) воздействия промышленного объекта;  $IX_{i\text{фон}}$  – значение того же  $i$ -го показателя, полученное для фоновой территории;  $n$  – общее число показателей, используемых для оценки.

Результаты вычислений, полученные на основе применения методики расчета ИПСЭ, удобно представлять в графической форме, а интерпретацию значений ИПСЭ проводить по шкале, которая разделяется на четыре диапазона (интервала), условно отражающие разные уровни сохранности биологического разнообразия и, соответственно, различную степень влияния промышленных предприятий:  $<0,8$  (красная зона) – интенсивное воздействие;  $0,8-0,89$  (оранжевая зона) – умеренное воздействие;  $0,9-0,99$  (желтая зона) – незначительное воздействие;  $\geq 1,0$  (зеленая зона) – фоновый полигон (участок). Соответственно, к первой области значений относятся наиболее уязвимые импактные зоны с высокой техногенной нагрузкой, где реализуются недостаточно эффективные природоохранные

<sup>1</sup> Интегральный показатель состояния экосистем (ИПСЭ) планируют использовать не только в Норильске, но и в заповедниках Заполярья. URL: <https://goarctic.ru/priroda/integralnyy-pokazatel-sostoyaniya-ekosistem-ipse-planiruyut-ispolzovat-ne-tolko-v-norilске-no-i-v-za>

<sup>2</sup> Долгоносики и жемчужницы: почему бизнесу важно сохранять биоразнообразие. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/cmrm/65797a099a79472e60c3933b>

<sup>3</sup> Загадочный ИПСЭ. URL: <https://life.nornickel.ru/indicator>

меры, далее – более устойчивые к антропогенным факторам, где эффективность применяемых средств защиты окружающей среды существенно выше. Такая индикация позволяет наглядно представлять себе экологическую ситуацию в зонах воздействия промышленных объектов в целом и сфокусировать внимание на наиболее узких местах при ситуационном управлении экологической безопасностью и устойчивостью территорий вокруг этих объектов.

Среди особенностей методики расчета ИПСЭ следует отметить следующие<sup>1</sup>:

1. Методика демонстрирует эффективность как при оценке ситуации за конкретный год, так и в динамике, что зависит от постановки задач. В первом случае она обеспечивает выявление и уточнение границ тех или иных зон антропогенного воздействия. Во втором – изменение ИПСЭ во времени (ДИПСЭ) позволяет определить условные потери или прирост биоразнообразия (последнее не всегда хорошо и может говорить о дисбалансе экосистем) из-за производственной деятельности от года к году, что, в свою очередь, позволит сделать ретроспективный анализ по результатам расчетов и данным импактного мониторинга за нескольких лет.

2. В разных дивизионах характер хозяйственной деятельности предприятий может отличаться. Соответственно может отличаться и ширина зон воздействия промышленных объектов. Если не учитывать эту специфику, то сравнивать ИПСЭ дивизионов между собой некорректно. Поправка на ширину служит «усреднителем» в математических расчетах.

3. Отличить сокращение численности индикаторного вида по естественным причинам от тех, что связаны с промышленным воздействием, не всегда бывает просто. Чтобы сделать это, требуется проводить долговременный мониторинг численности видов-индикаторов на разных участках изучаемого ареала. Значительные колебания численности видов могут отмечаться не только в зоне антропогенного воздействия предприятий, но и на фоновых (контрольных) территориях. Это также важно учитывать при расчетах. Отличия в динамике этих колебаний на фоновой площадке от динамики в зоне воздействия и позволяют сделать выводы. ИПСЭ одновременно показывает и степень изменения биоразнообразия, и уровень антропогенного воздействия на него.

Идея – выразить экологическую устойчивость [1] через числовой показатель не нова – это общемировой тренд в теории управления эколого-экономическими системами [11] и риск-менеджменте их безопасностью. Однако, как любая попытка определить качество функционирования природо-промышленных и биологических систем через цифру, ИПСЭ не лишен недостатков и поэтому нуждается в дополнительной научной проработке. К этим очевидным недостаткам методики расчетов ИПСЭ следует отнести:

1) отсутствие системы критериев выбора групп индикаторов биоразнообразия в условиях разных природных зон для регионов, где проводится мониторинг, а также достаточности выбора числа параметров индикаторов для проведения оценки;

2) отсутствие возможности анализа пространственно-временных рядов данных, которые являются основой адекватной интерпретации современного состояния экосистем и причин, его обуславливающих;

3) отсутствие возможности учета чужеродных, редких (охраняемых) видов и сообществ;

4) необходимость учета структуры доминирования сообществ, корреляцию с факторами антропогенного воздействия;

5) отсутствие возможности оценки фонового состояния экосистем;

6) необходимость актуализация списка индикаторных таксонов сообществ и видов с учетом их адаптации к экосистемам конкретных регионов;

7) необходимость нивелирования влияния побочных факторов на ИПСЭ, мешающих точной интерпретации данных и сравнению ИПСЭ между биотопами;

8) отсутствие возможности оперирования качественными показателями в методике расчета (в ИПСЭ учитываются только количественные показатели);

9) необходимость учета дополнительных ситуационных факторов при сохранении общей сбалансированности используемой системы показателей.

### Результаты и обсуждение

Для нивелирования перечисленных недостатков в ходе проведенных исследований предложен модифицированный метод, расширяющий возможности известных индикаторных подходов к оценке экологической устойчивости, включая методику расчета ИПСЭ, в части учета качественных

<sup>1</sup> Итоги Большой научной экспедиции 2022–2023. URL: <https://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?id=565f2f10-3c7b-4884-baca-3c796497ad5e>

показателей и влияющих ситуационных факторов, их неравнозначности и антагонистичности, а также в части поддержки адаптивной расширяемости используемой системы показателей в зависимости от региональной специфики. Разработанный метод можно отнести к классу многокритериальных комбинированных методов и позиционировать среди известных методических подходов как инструмент оценки и анализа экологической устойчивости на основе применения иерархической многоуровневой схемы декомпозиции «принцип – критерий – индикатор – показатель».

Основой предлагаемого метода оценки является разработанный в Институте проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН Национальный общественный стандарт «Экологическая безопасность Арктики» [12], определяющий многоуровневую систему индикаторов состояния экосистем АЗ РФ, используемую для анализа устойчивости объектов природной среды в условиях антропогенного воздействия на них хозяйствующих субъектов. Структура и базовые составляющие данного стандарта схематично представлены на рис. 3. Общие принципы, критерии и показатели, комплементарные целям устойчивого развития и отражающие различные стратегии/сценарии управления экологической безопасностью и устойчивостью природно-промышленных систем АЗ РФ, систематизированы в работах [12, 13]. Важно отметить при этом, что система общих и специфических индикаторов состояния экосистем и показателей экологического воздействия промышленных предприятий в каждом конкретном регионе, где планируется применять предлагаемый метод, должна корректироваться «под задачу», то есть уточняться и дополняться с учетом целей природоохранной деятельности и экологической политики, а также с учетом контекста текущей экологической ситуации и особенностей исследуемой территории. Обоснованный выбор и формирование релевантных групп индикаторов, а также определение их количества является самостоятельной задачей, требующей рационального решения. Кроме того, для получения более точных и адекватных оценок влияния промышленных объектов на состояние экосистем по выбранным критериям и показателям необходимо не только знать их актуальные значения, но и располагать ретроспективной информацией о результатах их мониторинга за многолетний период наблюдений/измерений, причем последнее в некоторых случаях и по некоторым видам индикаторов не всегда представляется возможным по причине полного или частичного отсутствия таких сведений. От полноты набора оцениваемых показателей во многом зависит эффективность принимаемых управленческих решений по реализации природоохранных мероприятий, направленных на минимизацию экологических рисков, смягчение последствий техногенного воздействия на природную среду и возмещение нанесенного ущерба элементам экосистем хозяйственной деятельностью промышленных предприятий.

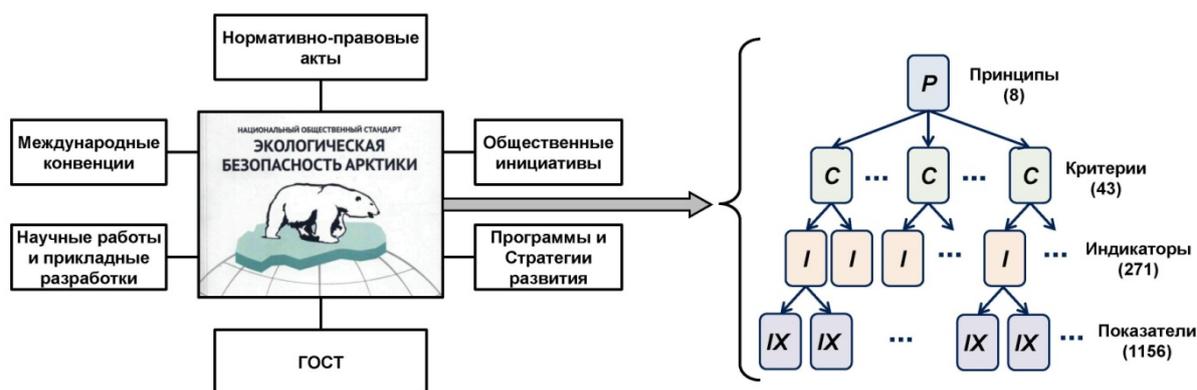


Рис. 3. Структура и состав Национального общественного стандарта «Экологическая безопасность Арктики»

Генеральная идея, послужившая толчком к созданию Национального Общественного стандарта «Экологическая безопасность Арктики», определяется следующими положениями:

1. Установление прозрачных правил экологичного поведения хозяйствующих субъектов на территории АЗ РФ.
2. Разработка системы индикаторов экологичного поведения, задающей ориентиры для действующих и новых предприятий на территории АЗ РФ.
3. Формирование единого свода лучших практик и инициатив научных, общественных и коммерческих организаций в сфере управления экологической устойчивостью.
4. Формирование единого свода отечественных и международных правил и требований в области охраны окружающей среды АЗ РФ.

5. Создание нового «института» добровольного принятия правил экологического поведения для действующих и новых предприятий на территории АЗ РФ.

Стандарт опирается на следующие основополагающие принципы:

1. Принцип соответствия законодательству Российской Федерации.
2. Принцип реализации прав и обязанностей владельцев и пользователей природных объектов на территории АЗ РФ.
3. Принцип учета прав и интересов коренных народов.
4. Принцип разумного природопользования в арктических условиях.
5. Принцип минимизации негативного воздействия на окружающую среду.
6. Принцип планового развития Арктики.
7. Принцип осуществления сквозного мониторинга и оценки воздействия на природную среду.
8. Принцип формирования и сохранения особых природоохранных зон для создания «экологического скелета» Арктики.

Стандарт прошел апробацию на общественных слушаниях при Минприроды России, ТПП РФ, РСПП, в органах государственной власти различного уровня, крупном бизнесе, экспертном сообществе в лице общественных и научных организаций, а также рекомендован к рассмотрению Арктическим Советом. Появление стандарта в нашей стране можно считать первым важным шагом в направлении развития и закрепления инструментов добровольного регулирования природоохранных норм и правил (добровольной сертификации) по аналогии с передовым опытом Финляндии, Канады, Исландии и других ведущих стран мира.

Структурно-методический подход к оценке и анализу экологической устойчивости представляет собой иерархически организованную схему декомпозиции и измерения всего множества выбранных показателей экологической безопасности, сфокусированных, главным образом, на социально-экономических и природно-промышленных аспектах устойчивости экосистем. На рис. 4 приведена общая структура метода оценки интегрального показателя состояния экосистем, адаптированная для задач обеспечения экологической безопасности и управления экологической устойчивостью на основе результатов исследований [9, 13, 14].

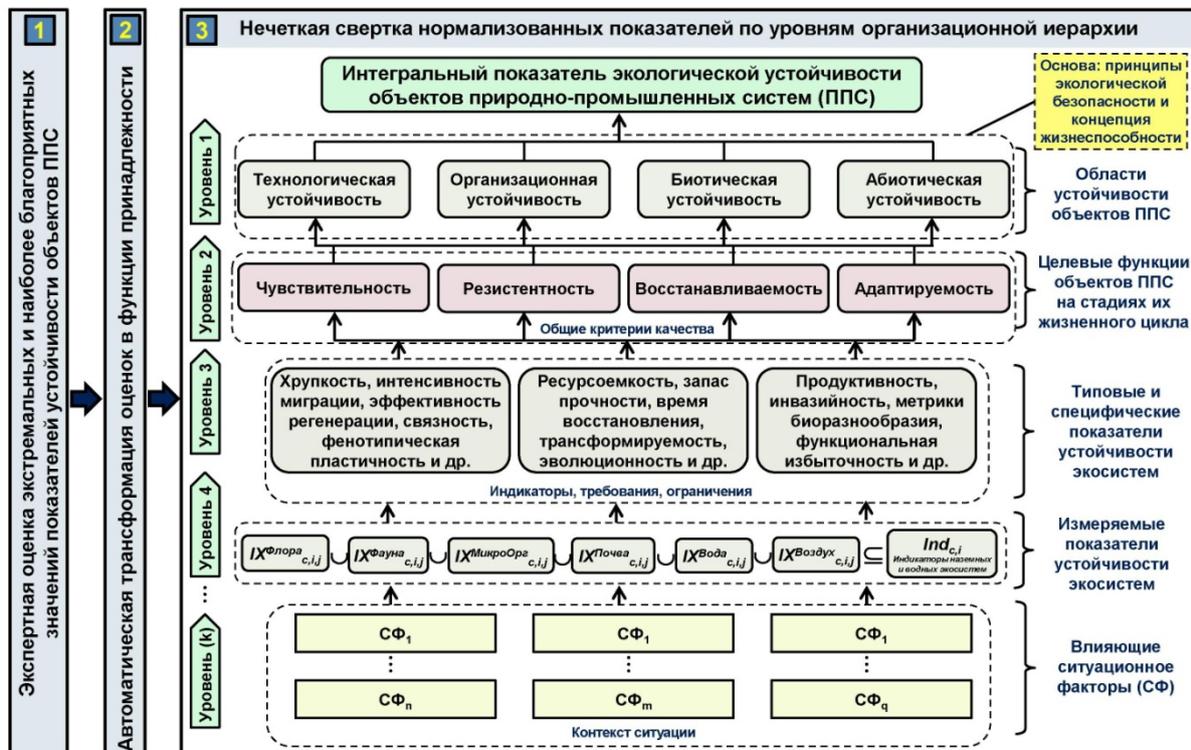


Рис. 4. Структура индикаторного метода многоуровневой интегральной оценки экологической безопасности и устойчивости объектов природно-промышленных систем

На различных этапах процедуры оценки решаются следующие задачи: выбор общих индикаторов и влияющих ситуационных факторов, количественный анализ и нормализация показателей,

фаззификация входных переменных и дефаззификация выходных параметров, агрегирование экспертных оценок, расчет средневзвешенных четких значений показателей, восходящий синтез и анализ интегрального индекса экологической устойчивости, представление результатов в табличной или графической форме и их интерпретация.

Для вычисления интегрального показателя экологической устойчивости объектов природно-промышленных систем, зависящего от многих параметров, необходимо, прежде всего, определить множество базовых индикаторов, характеризующих способность объектов системы к самосохранению и поддержанию своей функциональности, а также оценить их с учетом контекста ситуации, влияющих факторов, типа экосистем и областей устойчивости. Такая интегральная оценка строится на основе смешанной (аддитивно-мультипликативной) свертки нормированных частных критериев и индикаторов, образующих эти целевые показатели качества на нижних уровнях иерархической системы оценивания. Выбор смешанной свертки критериев обусловлен необходимостью соблюдения принципа «справедливого компромисса» между показателями экологической безопасности и устойчивости с учетом их неравнозначности, взаимозависимости и антагонистичности. При использовании данного вида свертки нивелируется эффект компенсации, когда неадекватные оценки по одним критериям могут быть компенсированы высокими оценками по другим, а также обеспечивается возможность оценивания критериев независимо друг от друга. Кроме того, наиболее полно учитывается качественный характер задания предпочтений экспертов при формировании интегрального показателя, когда изменение характеристик хотя бы одного из критериев может существенно повлиять на оценку параметров других.

Модель многоуровневой оценки интегрального индекса экологической устойчивости использует иерархическую систему показателей экологической безопасности, разработанную в результате обобщения существующих индикаторных систем [2, 11, 15–17] и формирования агрегированных показателей<sup>1</sup>, полученных путем свертки ряда групп общепринятых стандартных показателей надежности, безопасности и живучести природно-промышленных систем. Вместе с тем в модель заложены специфические характеристики жизнеспособности и устойчивости элементов природно-промышленных систем, отражающие индивидуальные особенности объектов, входящих в состав этих систем.

Разработанные принципы ( $P_1, \dots, P_8$ ) обеспечения экологической безопасности АЗ РФ, конкретизированные в рамках исследования [13], образуют верхний уровень (*Уровень 1*) интегральных индексов, используемых в процедуре многоуровневой оценки экологической устойчивости. *Уровень 1* априори считается исходно заданным. Каждый интегральный индекс на первом уровне декомпозируется на подмножество характерных для заданного контекста ситуации общих критериев, соответствующих определенным показателям второго уровня (*Уровень 2*) ( $C^1_{i\dots} C^1_{N-} C^8_{i\dots} C^8_M$ ). В общей сложности были выделены 43 критерия на втором уровне. *Уровень 2* является специализированным по части набора критериев, то есть настраиваемым под заданный контекст ситуации. Аналогично каждый критерий на втором уровне далее декомпозируется на следующее подмножество заданных, главным образом, измеримых показателей ( $I^i_{j\dots} I^i_K - I^8_{j\dots} I^8_L$ ), которые составляют третий уровень иерархии оценки. Здесь были определены 271 показатель. *Уровень 3* также является настраиваемым и привязанным к рассматриваемому контексту. В свою очередь, каждый показатель на третьем уровне дополнительно декомпозируется на подмножество отраслевых (организационных) индикаторов, специфичных для критически важных объектов или инфраструктур природно-промышленных систем, с учетом сценариев развития экологической ситуации, выбранных для анализа в заданных условиях. Первоначально на четвертом уровне было определено 1156 таких индикаторов. Таким образом, декомпозиция исследуемых показателей продолжается до *Уровня K*, где представлены атомарные измеримые индикаторы, описывающих влияние ситуационных факторов – природных и антропогенных ( $СФ_1, \dots, СФ_q$ ). *Уровень K* является основанием иерархической системы оценки экологической устойчивости, включающим множество различных количественных, полуколичественных и качественных показателей, относящихся к специфичным индивидуальным характеристикам природно-промышленных систем. Отобранные индикаторы, представленные на *Уровне K* ( $IX^{1ij}_p \dots IX^{1ij}_q - IX^{8ij}_p \dots IX^{8ij}_R$ ), преобразуются в количественные оценки в соответствии с выбранной шкалой измерений на основе методов нормализации и мягких вычислений. Для каждого показателя на уровнях 2, 3, ..., ( $K-1$ ),  $K$  экспертами определяются весовые коэффициенты с учетом их значимости и предпочтений для измерения. Когда фаззификация и определение весовых коэффициентов для всех показателей  $K$ -го уровня завершены,

<sup>1</sup> О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года : указ Президента РФ № 176 от 19.04.2017. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> .

итоговая оценка интегрального индекса экологической устойчивости вычисляется посредством взвешенного агрегирования полученных расчетных значений нормированных показателей снизу-вверх по иерархии от *Уровня K* до *Уровня 1* (при этом каждый показатель на данных уровнях имеет конкретную четкую оценку). В качестве альтернативы можно также сосредоточиться на анализе некоторых отдельных показателей на различных уровнях иерархии оценки, имеющих определенный интерес с исследовательской точки зрения и которые могут быть более подходящими для выявления «узких мест» (уязвимостей) в обеспечении экологической безопасности и устойчивости элементов природно-промышленных систем. Эта возможность достигается за счет гибкости применения предложенной процедуры оценивания. При этом выбор критериев и показателей, которые требуется измерить и оценить, начинается с верхнего *Уровня 1* и далее сверху-вниз до основания иерархии оценки, а само оценивание выбранных индикаторов начинается с *Уровня K* и далее снизу-вверх, то есть уровни 1, 2, ..., ( $K - 1$ ) объединяют в себе агрегированные показатели нижележащих уровней вплоть до *Уровня K*, а не реально измеримые показатели как таковые. Наконец, дефаззификация введенных в расчет нечетких оценок проводится до тех пор, пока не будут получены четкие оценки всех агрегированных показателей. После этого проводится анализ и интерпретация полученных оценок. Описанную процедуру оценки целесообразно применять совместно с методикой расчета ИПСЭ как для показателей зоны воздействия промышленных объектов, так и для фоновых показателей контрольных точек и полигонов.

Впоследствии выбор конкретных релевантных критериев и показателей на уровнях 2, 3, ..., ( $K - 1$ ),  $K$ , а также сбор данных для реализации процедуры их оценки будут зависеть от изначально заданного контекста экологической ситуации (условий и ограничений, принятых к рассмотрению) и детальной спецификации сценария развития ситуации, включая области устойчивости и типы исследуемых экосистем, модель актуальных угроз экологической безопасности и влияющие ситуативные факторы (физические, химические, микробогенные, зоогенные, фитогенные и т.д.). Установление весовых коэффициентов, характеризующих значимость отдельных измеряемых и контролируемых показателей, выбранных для оценки экологической устойчивости, является прерогативой специалистов-экспертов, проводящих мониторинговые исследования состояния экосистем и анализ динамики этих показателей.

При оценивании показателей эксперты определяют минимально возможное, наиболее оптимистичное (или интервал наиболее оптимистичных значений) и максимально возможное значения оценок этих показателей (влияющих факторов) на соответствующем уровне декомпозиции системы индикаторов экологической устойчивости.

Для преобразования нечетко определенных экспертных суждений о состоянии показателей экологической устойчивости объектов природно-промышленных систем в четкие характеристики с целью последующей работы с ними в дефаззифицированном виде к нечетким множествам применяется процедура дефаззификации полученных нечетких оценок экспертов, основанная на принципе выбора управляющего воздействия, соответствующего максимальному значению функции принадлежности, и центроидном методе дефаззификации (методе среднего центра) [18].

Все полученные треугольные нечеткие оценки по каждому показателю на  $k$ -м уровне должны агрегироваться. Следовательно, при числе экспертов  $E$  и когда треугольная нечеткая оценка  $e$ -го экспертного суждения о текущем состоянии  $j$ -го показателя на  $k$ -м уровне равна  $\tilde{ix}_{cije} = (ix_{cije}^1, ix_{cije}^2, ix_{cije}^3)$ ,  $e = \overline{1, E}$ , интегральная треугольная нечеткая оценка всех экспертных суждений ( $\tilde{IX}_{cij}$ ) о состоянии  $j$ -го показателя на  $k$ -м уровне может быть получена на основе следующей формулы:

$$\tilde{IX}_{cij} = (ix_{cij}^1, ix_{cij}^2, ix_{cij}^3) = \left( \min_E \{ix_{cije}^1\}, \frac{\sum_{e=1}^E ix_{cije}^2}{E}, \max_E \{ix_{cije}^3\} \right), \quad e = \overline{1, E}, \quad (2)$$

где « $\sim$ » – знак, обозначающий нечеткое множество;  $ix_{cije}^1, ix_{cije}^2, ix_{cije}^3$  – минимально возможное, наиболее оптимистичное и максимально возможное значения  $e$ -й экспертной оценки текущего состояния  $j$ -го показателя на  $k$ -м уровне соответственно.

После определения функций принадлежности, рангов критериев и рангов экспертов осуществляется агрегирование оценочных показателей качества в измеримый количественно интегральный критерий эффективности.

Агрегированные треугольные нечеткие числа являются нечеткими экспертными оценками текущего состояния показателей на  $k$ -м уровне. В результате дефазификации эти нечеткие оценки преобразуются в четкие оценки. Четкое значение треугольного нечеткого числа определяется по его четкому вероятностному среднему значению. Тогда, четкая оценка текущего состояния  $j$ -го показателя ( $IX_{cij}$ ) на уровне  $k$  может быть получена по следующей формуле:

$$IX_{cij}^k = \bar{M}(IX_{cij}^k) = \frac{(ix_{cij}^1 + 4ix_{cij}^2 + ix_{cij}^3)}{6}. \quad (3)$$

Оценка каждого показателя на  $(k-1)$  уровне вычисляется как взвешенная сумма оценок порождающих его показателей на  $k$ -м уровне по формуле:

$$(IX_{ci})_{k-1} = \left( \sum_{i,j=1}^{n,m} w_j IX_{cij} \right)_k, \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1, \quad (4)$$

где  $m$  – число показателей, связанных с  $i$ -м показателем на уровне  $k-1$ ;  $w_j$  и  $IX_{cij}$  являются соответственно весом и оценкой  $j$ -го показателя на  $k$ -м уровне и принимают значения от 0 до 1.

Аналогично получают оценки показателей для вышележащих уровней индикаторов  $(k-2), (k-3), \dots$  посредством агрегирования снизу-вверх вплоть до вершины иерархии:

$$(IX_c)_{k-2} = \left( \sum_{c,i=1}^{l,n} v_i IX_{ci} \right)_{k-1}, \quad \sum_{i=1}^n v_i = 1, \dots \quad (5)$$

$$(IX_p)_{k-3} = \left( \sum_{c=1}^l u_c IX_c \right)_{k-2}, \quad \sum_{c=1}^l u_c = 1, \dots \quad (6)$$

На верхнем уровне декомпозиции иерархической системы оценочных критериев и индикаторов обобщенная оценка интегрального показателя экологической устойчивости объектов природно-промышленных систем рассчитывается как средневзвешенное значение оценок всех характеристик рассматриваемых измерений (областей) устойчивости объектов природно-промышленных систем по следующей формуле:

$$ИЕС = \prod_{k=1}^K \left( \sum_{j \in G_k} w_j^k f(IX_{cij}^k, t) \right)^{\gamma} \rightarrow opt, \quad (7)$$

$$ИЕС = \frac{1}{d} \prod_{p=1}^d \rho_p IX_p = \frac{1}{d} \prod_{p=1}^d \rho_p \left[ \frac{1}{l} \sum_{c=1}^l u_c \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \left[ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_j \frac{IX_{cij}}{IX_{cij}^{фон}} \right] \right] \right], \quad (8)$$

$$\sum_{c=1}^l u_c = \sum_{i=1}^n v_i = \sum_{j=1}^m w_j = 1, \quad (9)$$

где  $IX_p$  и  $\rho_p$  – итоговые оценки и веса  $p$ -й области экологической устойчивости объекта природно-промышленной системы на верхнем уровне иерархии системы оценки соответственно;  $IX_{cij}$  – оценки частных показателей экологической устойчивости объекта природно-промышленной системы на уровнях  $(k-2), (k-1), (k)$  соответственно;  $l, n, m, \dots$  – число оцениваемых показателей экологической устойчивости объекта природно-промышленной системы на уровнях  $(k-2), (k-1), (k)$  соответственно;  $u_c, v_i, w_j, \dots$  – согласованные экспертами веса частных показателей экологической устойчивости объекта природно-промышленных системы, определенные на уровнях  $(k-2), (k-1), (k)$  соответственно;  $G_k$  – группы оценочных критериев и индикаторов состояния экосистем по уровням  $k$  организационной иерархии;  $d$  – число анализируемых областей экологической устойчивости

для исследуемого объекта природно-промышленной системы;  $\gamma$  – степень согласованности между целевыми показателями экологической безопасности, характеризующими динамику состояния областей устойчивости объекта природно-промышленной системы;  $t$  – параметр времени, отражающий динамику изменения рассматриваемых индикаторов безопасности и устойчивости экосистем.

Мера согласованности дефазсифицированных оценок экспертов определяется на базе вычисления коэффициентов конкордации и варибельности (разброса), учитывающих не только парные сравнения, но и общую структуру оценок. Если значения этих коэффициентов больше 0,7 и меньше 0,2 соответственно, то мнения экспертов считаются согласованными. В противном случае для достижения согласованности экспертных оценок применяется метод Дельфи или его модификации. Количественная оценка степени согласованности мнений экспертов определяется на основе статистических данных для всей группы экспертов.

Особенности предлагаемого метода интегральной оценки экологической безопасности и устойчивости природно-промышленных систем перечислены в табл. 1. Несмотря на ряд известных ограничений для всего класса методов мягких вычислений, предложенный подход к нечеткой иерархической оценке состояния экосистем в зонах промышленного воздействия показал свою пригодность и продемонстрировал приемлемые результаты [19, 20].

Таблица 1

Преимущества и ограничения разработанного индикаторного метода многоуровневой оценки интегрального показателя экологической безопасности и устойчивости территории

Преимущества	Ограничения
<ul style="list-style-type: none"> <li>– структурная наглядность, простота реализации;</li> <li>– универсальность, то есть применимость ко всем типам КВО/ПОО и критических инфраструктур;</li> <li>– учет императивов, многокритериальной сущности экологической безопасности и неопределенности динамических характеристик объектов в процессе анализа и оценки экологической устойчивости на всех этапах жизненного цикла компонентов экосистем;</li> <li>– возможность сопряжения количественных и качественных показателей состояния экосистем в одной вычислительной оценочной модели интегрального индекса экологической устойчивости;</li> <li>– возможность учета неравнозначности и антагонистичности показателей экологической безопасности и вклада каждого показателя в агрегированную оценку;</li> <li>– возможность ранжирования показателей экологической безопасности в зависимости от исследуемого контекста (ситуационных факторов), целеполагания, и типа экосистем;</li> <li>– возможность самоаудита (самопроверки), то есть решения обратной задачи на каждом уровне иерархической оценки</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая стоимость организации квалифицированной экспертизы и непрерывного импактного мониторинга;</li> <li>– субъективизм экспертных суждений;</li> <li>– возможность ошибок в силу ограниченности знаний экспертов или неполноты мониторинговых исследований (запаздывания статистики);</li> <li>– сложность определения количества привлекаемых экспертов и согласования интересов всех стейкхолдеров;</li> <li>– необходимость большого количества исторических и оперативных данных для точности и адекватности оценки;</li> <li>– выбор и обоснование вида функции принадлежности и весовых коэффициентов важности критериев в нечеткой модели оценки;</li> <li>– сложность интерпретации физического смысла числового значения интегрального показателя экологической безопасности, полученного на основе агрегирования оценок частных показателей и нечеткой средневзвешенной свертки</li> </ul>

Материалы исследования показали, что разработанный метод интегральной оценки экологической безопасности и устойчивости объектов природно-промышленных систем не противоречит известным подходам, принятым в мировой практике, а лишь дополняет и улучшает их в части гибкости настройки параметров, адаптивности к изменяющимся условиям и прозрачности процедуры оценки, а также легкости интерпретации результатов, что так важно для практического применения. Резюмируя, отметим, что предложенный метод является в некотором смысле универсальным подходом, обеспечивающим реализацию процедур систематической оценки и комплексного анализа экологической безопасности и устойчивости объектов природно-промышленных систем. Поскольку метод в большей

степени предназначен для самоаудита и самооценки, он может быть в ряде случаев не вполне объективным, но тем не менее получаемые с его помощью результаты (оценки) являются достаточно индикативными для поддержки принятия управленческих решений по повышению экологической безопасности и устойчивости природно-промышленных систем в условиях интенсификации техногенного воздействия на их объекты промышленными предприятиями региона. Полученные оценки обеспечивают возможность выявления потенциальных угроз биоразнообразию этих объектов и смягчение последствий нарушения экосистемных функций компонентов природно-промышленных систем путем устранения установленных уязвимостей и принятия адекватных ситуации превентивных и реактивных защитных мер. Повышение объективности и адекватности метода для получения более точных результатов с различных точек зрения может быть в дальнейшем достигнуто за счет его использования в сочетании с другими известными методами ситуационного управления, экологического менеджмента, каузального и предиктивного анализа устойчивости живых и природоподобных динамических систем.

### Заключение

Наблюдаемая сегодня тенденция приоритизации государственной политики в части повышения эффективности природоохранной деятельности, направленной на обеспечение экологического благополучия населения, сохранение биоразнообразия и охрану окружающей среды, определяет новые стандарты, требования и подходы к поддержанию экологической безопасности и устойчивости объектов природно-промышленных систем при разработке и реализации в АЗ РФ комплексных инвестиционных планов развития отраслей и секторов экономики, принятии решений о запуске инфраструктурных проектов, а также в рамках текущей операционной деятельности всех хозяйствующих субъектов. Учитывая взаимосвязи акторов и элементов природно-промышленных систем разного уровня, функционирующих как совокупность взаимозависимых объектов, процессов, организаций и инфраструктур, функции управления безопасностью и устойчивостью этих сложных систем подразделяются на составляющие и, как правило, регулируются различными органами (ведомствами) и по неоднородным критериям. Вместе с тем многообразие типов и групп стейкхолдеров, действующих в АЗ РФ, на фоне многоаспектности и сложности современных проблем инфраструктурного развития АЗ РФ актуализирует задачу разработки научно-методических основ и методологических принципов формирования сбалансированной государственной политики обеспечения экологической безопасности, ориентированной на гармонизацию техногенной нагрузки на экосистемы, экономического роста и социальной стабильности в процессе реализации природоохранных мероприятий. Однако существующая система импактного мониторинга, методики индикаторной оценки состояния экосистем и экологического нормирования, заложенные в действующем российском законодательстве, имеют значительные пробелы и неточности, которые непосредственно или косвенно влияют на эффективность природоохранной деятельности как самих объектов инфраструктуры (например, промышленных предприятий) или иных ее акторов, так и всей системы правового регулирования природоохранной деятельности региональных органов государственной власти. Поэтому стратегическое управление экологической безопасностью и устойчивостью объектов природно-промышленных систем должно подкрепляться развитым нормативным обеспечением и сопровождаться адекватной опциональной информационно-аналитической поддержкой.

Для информационно-аналитической поддержки многокритериального принятия решений в области управления экологической устойчивостью критически важных объектов природно-промышленных систем АЗ РФ разработан модифицированный индикаторный метод многоуровневой агрегированной оценки и анализа разнородных показателей их надежности и безопасности, расширяющий возможности известных методик расчета интегрального показателя состояния экосистем в части учета качественных показателей и влияющих ситуационных факторов, их неравнозначности и антагонистичности, а также сохранения сбалансированности выбранных показателей. Отличия метода заключаются в экспертной оценке экстремальных и наиболее благоприятных значений показателей экологической устойчивости объектов с последующей автоматической трансформацией оценок в функции принадлежности и нечеткой сверткой нормализованных показателей по уровням организационной иерархии. Метод позволяет количественно оценить степень влияния объектов природно-промышленных систем на состояние устойчивости экосистем в условиях неполной определенности

исходных данных и может быть использован для планирования и оптимизации комплекса превентивных и реактивных мер по повышению экологической безопасности территорий при импактном мониторинге этих объектов.

Дальнейшие исследования будут направлены на апробацию предложенного метода на практике, верификацию и валидацию результатов его работы для конкретных импактных зон промышленных объектов и площадок, расположенных на территории Мурманской области. Перспективным представляется также программная реализация метода в виде инструмента информационной поддержки принятия управленческих решений в сфере природоохранной деятельности, ориентированного на повышение эффективности обеспечения экологической безопасности и устойчивости объектов природно-промышленных систем на всех стадиях управления ими.

### Список литературы

1. Holling C. S. Resilience and stability of ecological systems // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973. № 4. P. 1–23.
2. Liu Ch., Li W., Xu J. [et al.]. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: A literature review and bibliometric analysis // *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 137. Article no. 108734.
3. Spitz K., Trudinger J., Orr M. *Environmental Social Governance*. 1st ed. CRC Press, 2022. 278 p.
4. Dathe T., Dathe R., Dathe I., Helmold M. *Corporate Social Responsibility (CSR), Sustainability and Environmental Social Governance (ESG). Approaches to Ethical Management*. Springer Cham, 2022. 203 p.
5. Белик И. С., Стародубец Н. В., Майорова Т. В., Ячменева А. И. Механизмы реализации концепции низкоуглеродного развития экономики. Уфа : МЦИИ «Омега Сайнс», 2016. 119 с.
6. Альхимович И. Н., Амирова Н. Р., Бурденко Е. В. [и др.]. Зеленая экономика в парадигме устойчивого развития. М. : ИНФРА-М, 2023. 248 с.
7. Макаров Д. В., Боровичев Е. А., Ключникова Е. М. [и др.]. Охрана природы в условиях развитого горно-промышленного комплекса Мурманской области // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2020. № 2. С. 5–14.
8. Дядик Н. В., Чапаргина А. Н., Дядик В. В. [и др.] Контент-анализ методов оценки экологической безопасности территории // *Московский экономический журнал*. 2023. Т. 8, № 9. С. 364–383.
9. Masloboev A. V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations (Part 1. Problem statement and method generic structure) // *Reliability and quality of complex systems*. 2024. № 1. P. 124–141.
10. 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. P. 130–156.
11. Burkov V. N., Novikov D. A., Shchepkin A. V. *Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems* // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015. Vol. 10. 166 p.
12. Национальный общественный стандарт «Экологическая безопасность Арктики» / под ред. Н. А. Кашулина, В. А. Маслобоева. М. : Либри Плюс, 2016. 88 с.
13. Masloboev A. V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian Arctic (Part 1. Resilience management principles) // *Reliability and quality of complex systems*. 2023. № 1. P. 142–156.
14. Masloboev A. V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian Arctic (Part 2. Assessment procedure and criteria) // *Reliability and quality of complex systems*. 2023. № 2. P. 115–126.
15. Zhang R., Wang Ch., Xiong Ya. Ecological security assessment of China based on the pressure-state-response framework // *Ecological Indicators*. 2023. Vol. 154. Article no. 110647.
16. Hashemi R., Darabi H. The Review of Ecological Network Indicators in Graph Theory Context: 2014–2021 // *International Journal of Environmental Research*. 2022. Vol. 16. Article no. 24.
17. Смирнова Е. Э. Экологические стандарты управления качеством окружающей среды / под науч. ред. А. Н. Ларионова. СПб. : СПбГАСУ, 2024. 537 с.
18. Семина С. С., Конохов А. Н. Быстрая центроидная дефазификация субнормальных нечетких интервалов // *Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2022) : сб. тр. V Междунар. науч.-техн. форума (г. Рязань, 2–4 марта 2022 г.) : в 10 т. / под общ. ред. О. В. Миловзорова*. Рязань : РГРТУ, 2022. Т. 5. С. 98–104.
19. Экосистемы в районе Кольской АЭС (Мурманская область): современное состояние / под ред. В. А. Маслобоева, Е. А. Боровичева и Д. А. Давыдова. Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2024. 468 с.
20. Амосов П. В. [и др.] Пыление хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути ее решения. Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 168 с.

21. 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. doi: 10.21685/2307-4205-2022-4-13
22. Кубасов И. А. Промышленный интернет вещей как революционный скачок развития // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 83–89. doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-9

### References

1. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973;(4):1–23.
2. Liu Ch., Li W., Xu J. et al. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: A literature review and bibliometric analysis. *Ecological Indicators*. 2022;137(108734).
3. Spitz K., Trudinger J., Orr M. *Environmental Social Governance*. 1st ed. CRC Press, 2022:278.
4. Dathe T., Dathe R., Dathe I., Helmold M. *Corporate Social Responsibility (CSR), Sustainability and Environmental Social Governance (ESG). Approaches to Ethical Management*. Springer Cham, 2022:203.
5. Belik I.S., Starodubets N.V., Mayorova T.V., Yachmeneva A.I. *Mekhanizmy realizatsii kontseptsii nizkouglerodnogo razvitiya ekonomiki = Mechanisms of implementation of the concept of low-carbon economic development*. Ufa: MTsII «Omega Sayns», 2016:119. (In Russ.)
6. Al'khimovich I.N., Amirova N.R., Burdenko E.V. et al. *Zelenaya ekonomika v paradigme ustoychivogo razvitiya = Green economy in the paradigm of sustainable development*. Moscow: INFRA-M, 2023:248. (In Russ.)
7. Makarov D.V., Borovichev E.A., Klyuchnikova E.M. et al. Nature protection in the conditions of the developed mining complex of the Murmansk region. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020;(2):5–14. (In Russ.)
8. Dyadik N.V., Chapargina A.N., Dyadik V.V. et al. Content analysis of methods for assessing environmental safety of a territory. *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal = Moscow Economic Journal*. 2023;8(9):364–383. (In Russ.)
9. Masloboev A.V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations (Part 1. Problem statement and method generic structure). *Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):124–141.
10. 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.
11. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015;10:166.
12. Kashulin N.A., Masloboev V.A. (eds.). *Natsional'nyy obshchestvennyy standart «Ekologicheskaya bezopasnost' Arktiki» = National public standard "Environmental safety of the Arctic"*. Moscow: Libri Plyus, 2016:88. (In Russ.)
13. Masloboev A.V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian Arctic (Part 1. Resilience management principles). *Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):142–156.
14. Masloboev A.V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian Arctic (Part 2. Assessment procedure and criteria). *Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):115–126.
15. Zhang R., Wang Ch., Xiong Ya. Ecological security assessment of China based on the pressure-state-response framework. *Ecological Indicators*. 2023;154(110647).
16. Hashemi R., Darabi H. The Review of Ecological Network Indicators in Graph Theory Context: 2014–2021. *International Journal of Environmental Research*. 2022;16(24).
17. Smirnova E.E. *Ekologicheskie standarty upravleniya kachestvom okruzhayushchey sredy = Ecological standards of environmental quality management*. Saint Petersburg: SPbGASU, 2024:537. (In Russ.)
18. Semina S.S., Konyukhov A.N. Rapid centroid defuzzification of subnormal fuzzy intervals. *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii (STNO-2022): sb. tr. V Mezhdunar. nauch.-tekhn. foruma (g. Ryazan', 2–4 marta 2022 g.): v 10 t. = Modern technologies in science and education (STNO-2022) : collection of tr. V International Scientific and Technical Forum (Ryazan, March 2-4, 2022) : in 10 volumes*. Ryazan': RGRU, 2022;5:98–104. (In Russ.)
19. Masloboev V.A., Borovichev E.A., Davydov D. A. (eds.). *Ekosistemy v rayone Kol'skoy AES (Murmanskaya oblast'): sovremennoe sostoyanie = Ecosystems in the area of the Kola NPP (Murmansk region): the current state*. Apatity: FITs KNTs RAN, 2024:468. (In Russ.)
20. Amosov P.V. et al. *Pylenie khvostov obogashcheniya apatit-nefelinovykh rud: ekologicheskaya problema i puti ee resheniya = Dusting of tailings from the enrichment of apatite-nepheline ores: an environmental problem and ways to solve it*. Apatity: FITs KNTs RAN, 2023:168. (In Russ.)
21. 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 system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):120–134. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-4-13
22. Kubasov I.A. Industrial Internet of Things as a revolutionary development leap. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):83–89. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-9

**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

**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)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию / Received 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования / Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации / Accepted 05.05.2025**

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ПОЕЗДОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ

В. П. Перевертов<sup>1</sup>, Н. К. Юрков<sup>2</sup>, И. К. Андрончев<sup>3</sup>, В. Н. Новикова<sup>4</sup>, Н. А. Кузин<sup>5</sup>

<sup>1,4</sup> Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

<sup>2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>3</sup> Академия стандартизации, метрологии и сертификации, Москва, Россия

<sup>5</sup> Московский автодорожный институт (технический университет), Москва, Россия

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

<sup>4</sup> novikova@samgups.ru, <sup>5</sup> sputnik1985nk3y@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассмотрены вопросы повышения безопасности движения и надежности технических средств газотурбинных поездов (систем) в высокоскоростных магистралях (ВСМ). *Материалы и методы.* Для оценки и управления безопасностью движения поездов подходят комплексные показатели в виде: вероятности безотказной работы технических средств, коэффициента готовности, а также наработки на отказ (RAMS) и особенности применения газотурбинной тяги в качестве силовой установки (системного элемента) газотурбинного подвижного состава при эксплуатации на высокоскоростных ВСМ. Для анализа надежности и безопасности газотурбинных мотор-вагонных поездов по сравнению с поездами на дизельных силовых установках и электропоездами на магнитной подушке и т.д. используются адаптивные методы сравнительного анализа информации, ранжирования. *Результаты и выводы.* Показано, что внедрение газотурбинной тяги позволит снизить инвестиционные и эксплуатационные расходы ВСМ железных дорог при сохранении динамических характеристик поездов, включая тормозную систему.

**Ключевые слова:** технологии искусственного интеллекта, аддитивные, традиционные, гибридные, надежность, газотурбинная тяга, мотор-вагонные поезда

**Для цитирования:** Перевертов В. П., Юрков Н. К., Андрончев И. К., Новикова В. Н., Кузин Н. А. Особенности повышения безопасности движения и надежности применения газотурбинных поездов в высокоскоростных железнодорожных магистралях // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 136–144. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-14

## FEATURES OF INCREASING TRAFFIC SAFETY AND RELIABILITY OF USING GAS-TURBINE TRAINS IN HIGH-SPEED RAILWAYS

V.P. Perevertov<sup>1</sup>, N.K. Yurkov<sup>2</sup>, I.K. Andronchev<sup>3</sup>, V.N. Novikova<sup>4</sup>, N.A. Kuzin<sup>5</sup>

<sup>1,4</sup> Volga State Transport University, Samara, Russia

<sup>2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>3</sup> Academy of Standardization, Metrology and Certification, Moscow, Russia

<sup>5</sup> Moscow Road Institute (Technical University), Moscow, Russia

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

<sup>4</sup> novikova@samgups.ru, <sup>5</sup> sputnik1985nk3y@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The article considers the issues of increasing traffic safety and reliability of technical means of gas turbine trains (systems) in high-speed railways (HSR). *Materials and methods.* Complex indicators in the form of: probability of failure-free operation of technical means, availability factor, as well as time between failures (RAMS) and features of using gas turbine traction as a power plant (system element) of gas turbine rolling stock during operation on high-speed HSR are suitable for assessing and managing train traffic safety. To analyze the reliability and safety of gas-turbine motor-car trains in comparison with trains on diesel power plants and electric trains, magnetic levitation, etc., adaptive methods of comparative analysis of information, ranking are used. *Results and conclusions.* It is shown that the introduction of gas-turbine traction will reduce investment and operating costs of high-speed railways while maintaining the dynamic characteristics of trains, including the braking system.

**Keywords:** artificial intelligence (AI) technologies, additive, traditional, hybrid, reliability, gas-turbine traction, motor-car trains

**For citation:** Perevertov V.P., Yurkov N.K., Andronchev I.K., Novikova V.N., Kuzin N.A. Features of increasing traffic safety and reliability of using gas-turbine trains in high-speed railways. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):136–144. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-14

Трендом развития железных дорог является строительство высокоскоростных магистралей (ВСМ) на основе синтеза технологий искусственного интеллекта (ИИ), концентрированных источников энергии (лазерных, плазменных, ионных и т.д.) и аддитивных (3D) технологий из разных материалов и сплавов, включая композиционные и нанокристаллические. Это позволит в автоматизированном цифровом режиме строить трехмерные изделия (детали) по компьютерной модели; сократить время и затраты на получение изделия; изучать технологию послойного синтеза (диагностика) металлических, металлокерамических и наноструктурированных порошковых композитов; внедрить производственные лазерные, плазменные и ионные системы для сплавления металлопорошковых композиций; создать на основе новых датчиков системы контроля, диагностики и интеллектуального управления гибридными технологиями (традиционные и аддитивные технологии), обеспечивающих высокую надежность транспортной железнодорожной системы [6–14].

Проект «высокоскоростной грузопассажирской железнодорожной магистрали (ВСМ) «Москва – Пекин» протяженностью 7000 км позволит сократить время в пути до 32 ч вместо пяти суток в настоящее время. Свою часть пути (3200 км) китайцы уже построили. ВСМ будет использоваться как для пассажирских, так и для грузовых контейнерных перевозок. Первым участком на территории России станет магистраль Екатеринбург–Челябинск. Время в пути 1 ч 10 мин. В КНР построено 42 000 км ВСМ, за последние 20 лет, включая сообщение между Пекином и Шанхаем протяженностью 620 км со скоростью до 400 км/ч. ВСМ в Китае – это полностью новые ветки, строящиеся по другим технологическим стандартам. У них меньше углы поворотов и подъемов, рельсы стоят на «безбалластном пути» на бетонном основании. Развитие ВСМ стало не причиной, а следствием экономического развития КНР.

Анализ строительства в России железнодорожных высокоскоростных магистралей (ВСМ) для перевозки пассажиров и грузов Москва–Санкт-Петербург, Москва–Казань, Москва–Сочи и т.д. показал, что основным риском инвестиционных проектов является длительный срок окупаемости, безопасность и надежность всех системных элементов скоростных поездов. Необходимо учитывать планы развития смежных видов транспорта: скоростных автомагистралей, авиационного, морского, речного сообщения [2–5, 13, 14].

Основным элементом системы скоростного подвижного состава (ПС) является силовая установка: дизельная, электрическая, газогенераторная, газодизельная, газотурбинная, комбинированная, магнитная и др. В газотурбинных поездах (систем) основой тяги является газотурбинный двигатель (ГТД), изготовленный из новых материалов и сплавов [1–3, 5–14]. Создание мотор-вагонных поездов, работающих на ГТД и электрической тяге обеспечит оптимальный эксплуатационный режим работы силовых установок высокоскоростных ПС на номинальной мощности [2–13], улучшит показатели управляемости поездом (разгонные и тормозные характеристики), безопасность движения, эффективность тяги, рост пропускных способностей железных дорог.

Требования по надежности относятся как к самой системе ПС и ее составным элементам, так и к точности и достоверности исходных данных датчиков, формулированию критериев отказов, повреждений и предельных технических состояний, к методам контроля надежности на всех этапах жизненного цикла изделия. Параметры системной надежности ГТД ПС должны учитывать структуру системы, состав и взаимодействие входящих в нее элементов, возможность перестройки структуры и алгоритмов ее функционирования при отказах отдельных элементов [8–14]. Моделирование надежности систем ПС – это технологический процесс **прогнозирования системы** до ее ввода в эксплуатацию с использованием методов анализа «деревьев неисправностей» и структурных схем надежности, элементы которых будут применяться в системе и представляется взаимоотношение между различными элементами (компонентами) системы. Данные о прогнозировании получают по результатам исследований двух основных видов:

- 1) анализ физики отказов, при котором исследуются механизмы возникновения отказов, например, механизм усталостного разрушения материала;
- 2) анализ результатов испытаний (эмпирический метод), при котором подсчитывается число элементов системы, отказавших при разных нагрузках воздействия.

Технология проектирования надежности начинается с разработки модели на основе структурных схем надежности или «деревья неисправностей» с учетом введения избыточности или резервирования – способ обеспечения надежности изделия за счет дополнительных средств и возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций. Путем введения избыточности совместно с мониторингом отказов, системы с низкой надежностью по одному каналу могут в целом обладать высоким уровнем надежности. Введение избыточности на

высоком уровне в динамической системе, например, на уровне силового оборудования (двигателя) ПС – это сложно и дорого, что ограничивает такое резервирование. На низком уровне системы резервирование (датчики) реализуется быстро и просто.

Для анализа надежности ГТД, специфических для железнодорожной отрасли, применим общие методики:

- 1) виды и последствия отказов;
- 2) имитационное моделирование и анализ опасностей;
- 3) анализ структурных схем надежности и «деревьев отказов»;
- 4) устранение критичных отказов и анализ ремонтпригодности, ориентированной на безотказность;
- 5) диагностики отказов и анализ ошибок человека-оператора.

Это поможет обнаружить отказы и обеспечить работоспособность системы в соответствии с заданными требованиями на разных уровнях, используя такие методы, как анализ роста надежности, анализ отказов и корректирующих действий. Недостатками таких испытаний являются **время** и **затраты**. В таких случаях могут быть использованы ускоренные испытания в динамической среде, позволяющие оценить качество и надежность структурно-сложных динамических систем с учетом их старения, усталости, износа и деградации в ходе их эксплуатации. Надежность транспортно-технологической системы отличается от **безопасности** отношением к видам опасностей, с которыми она имеет дело. Низкая надежность может перерасти в аварии по причине неготовности системы, высоких затрат на запасные части и ремонт, перерывов в нормальной работе и т.п. Безопасность относится к тем случаям проявления опасности, которые могут привести к потенциально тяжелым авариям. Требования по безопасности функционально связаны с требованиями по надежности, но характеризуются более высокой ответственностью. Безопасность имеет дело с опасными событиями для жизни людей и окружающей среды в том же смысле, что и надежность, но не связана напрямую со стоимостными показателями и не относится к действиям по восстановлению после отказов и аварий (катастроф).

Организация перевозочного процесса требует обеспечить перевозку грузов (контейнер) и пассажиров на заданном маршруте в заданное время, при соблюдении соответствующих видов безопасности: экологическую, пожарную, информационную, радиационную и т.д., при запланированных нормах затрат ресурсов на выполнение этих технологических операций. Необходимо обеспечить взаимодействие всех служб для надежной организации перевозочного процесса. Все это отражается в нормативно-технической документации, в стандартах организации. Некоторые элементы, связанные с количественными показателями, а также общими нормами организации перевозочного процесса, попадают в стандарты и специальные технические регламенты. Достижения высоких показателей надежности и безопасности определяются действующей нормативной базой и требуют анализа стандартов, технических условий и выявления технологических процессов и операций, которые оказывают влияние на надежность технических средств и безопасность движения поездов.

Отказоустойчивость – надежность может быть увеличена при использовании резервирования на уровне системы, но это может привести к снижению безопасности за счет увеличения вероятности ложной тревоги (например, ложное срабатывание тормозной системы ПС). Отказоустойчивые мажоритарные системы могут увеличить как надежность, так и безопасность на системном уровне. *Оценка надежности техники при эксплуатации системы включает в себя мониторинг – цифровое и визуальное наблюдение за критическими параметрами, выявленными на стадии проектирования при разработке «дерева неисправностей».* Для обеспечения заданной надежности системы данные постоянно анализируются, используя статистические методы (системы отчетов об отказах и авариях, анализе корректирующих действий [8–14].

В газотурбинных поездах основным элементом системы, кроме систем контроля, диагностики, управления всеми элементами, являются передаточные механизмы (передачи, трансмиссии), колесные пары (колесо-рельс), корпус (рама вагона, тележки, автосцепки) ПС, силовой газотурбинный двигатель (ГТД), изготовленные из новых материалов и сплавов, включая порошковые композиты и наноматериалы на основе аддитивных и гибридных технологий [13, 14].

Анализ мощности газотурбовоза ГТh1 – 8500 кВт с суммарной мощностью 10-вагонного высокоскоростного электропоезда «Сапсан» показал, что возможно создание автономного мотор-вагонного поезда с несколькими ГТД, сопоставимого по мощности мотор-вагонному поезду электрической тяги, модульной компоновки [2, 4–11]. При оценке методов контроля и диагностики в системе ВСМ необходим экспертный анализ методов с концептуальными признаками:

- 1) проектирование технологий диагностики как параметров ГТД, так и транспортной системы (ВСМ) в целом;

- 2) разработка алгоритма выбора технологических датчиков, включая интеллектуальные датчики для технологий искусственного интеллекта, основы гибких производственных систем;
- 3) контроль и диагностика параметров при гибридных технологиях на основе концентрированных источников энергии для новых материалов, сплавов, нанокompозитов в системе ГТД, выделении из них материалов со свойствами, имеющими более высокие характеристики [1–5, 11–13, 14] по сравнению с традиционными материалами и титановыми сплавами (рис. 1).

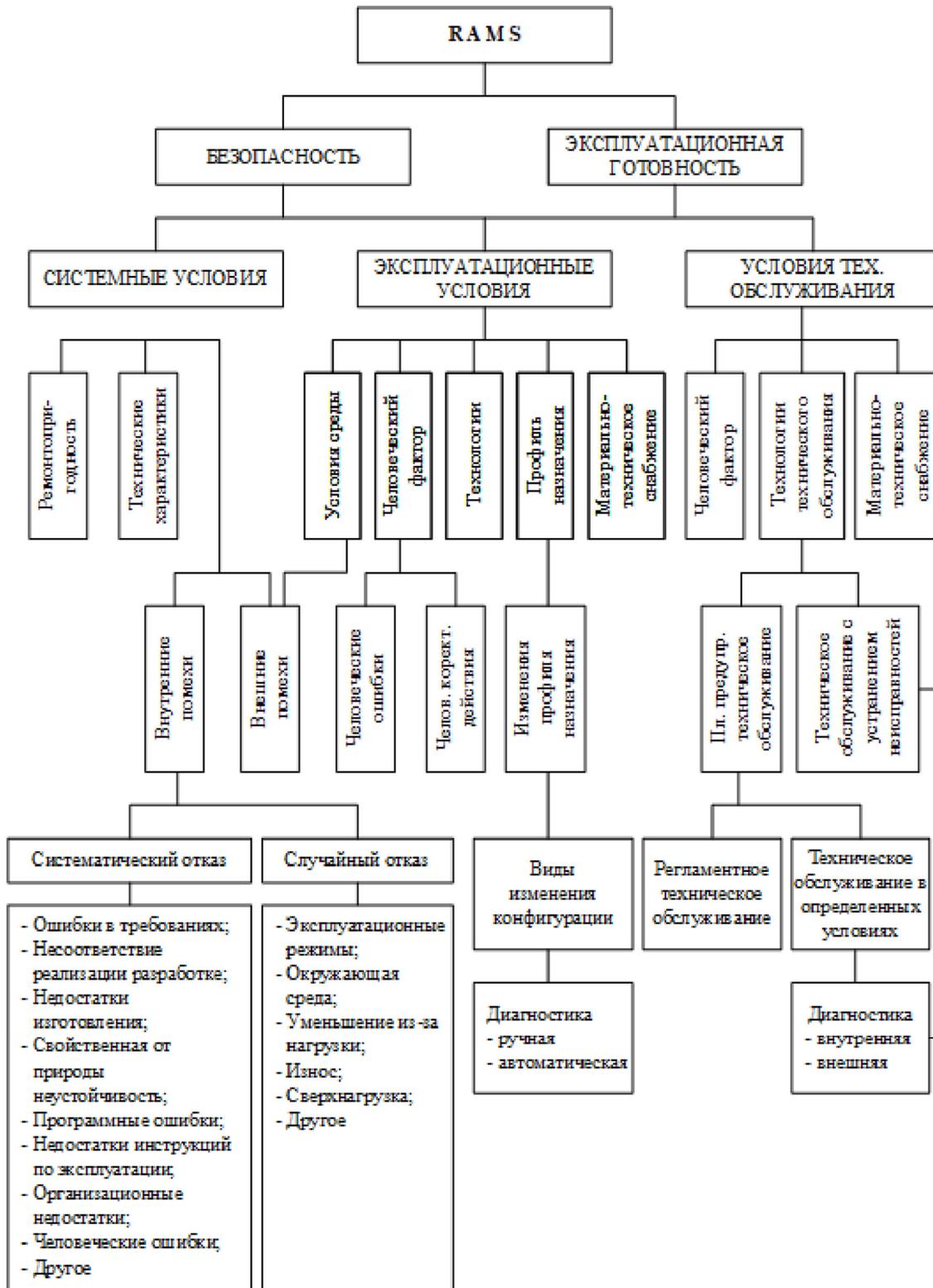


Рис. 1. Факторы, влияющие на обобщенные показатели безопасности и надежности (RAMS) для железнодорожного транспорта ВСМ

Создание ПС для ВСМ, где в качестве тягового средства будут эксплуатироваться мотор-вагонные поезда, работающие на силовых газотурбинных двигателях (ГТД) и электрической передаче переменного-постоянного тока, позволит отказаться от инвестиций в дорогостоящее проектирование, строительство и последующее содержание объектов энергохозяйства, специализированной высокоскоростной контактной сети, что обеспечит удешевление проектов ВСМ, сокращение сроков строительства, ускорение окупаемости дорог. Эксплуатационный режим силовых тяговых установок высокоскоростных поездов характеризуется работой на номинальной мощности. Поэтому на первый план выходят требования малого веса и аэродинамической формы высокоскоростного ПС. Оценка перспектив использования газотурбинной тяги поездов на ВСМ России в отношении масса-габаритных и энергетических показателей (параметров) выявила **основные преимущества**:

- 1) высокие мощностные характеристики, работа с максимальным КПД на номинальной мощности, на которой эксплуатируются высокоскоростные поезда;
- 2) меньшая (в два раза) стоимость потребляемого топлива (сжиженного природного газа) по сравнению со стоимостью электрической энергии;
- 3) модульность конструкции, малые габариты и на порядок меньшая масса ГТД, чем у тепловозного дизеля;
- 4) доступность технологии сервиса (осмотр, контроль и диагностика) позволяют эксплуатировать ГТД по техническому состоянию и сократить затраты на ремонт на 15–20 % за период жизненного цикла ГТД [1–9, 13];
- 5) работа ГТД стабилизирует режим работы двигателя в период отправления и прибытия поезда;
- 6) высокая автономность и способность работы высокоскоростных турбо-поездов в любых метеоусловиях;
- 7) термодинамические и экологические преимущества газомоторного топлива по сравнению с дизельным обусловлены энергетическими и физическими показателями природного газа. Значения выбросов токсичных веществ ниже в 1,5–2 раза [2–5, 13];
- 8) ГТД является «мягким» демпфирующим элементом при динамических воздействиях, поэтому можно ожидать устойчивую и надежную работу карданных систем» [1–2, 4–13];
- 9) применения мотор-вагонных поездов в грузовом движении [1–13] улучшает управляемость ПС; в повышении разгонных и тормозных характеристик, безопасности движения, эффективности данного вида тяги, росте пропускных способностей железных дорог.

#### **Недостатки:**

1. Необходимость размещения на ПС больших емкостей для дальности хода. В качестве основного вида топлива следует использовать сжиженный природный газ, в том числе в переохлажденном состоянии [1–13].
2. Большое потребление газа в режиме малых нагрузок, а также при запуске ГТД. В связи с этим на турбопоездах целесообразно применение многодвигательных газотурбинных установок с отключением части ГТД при работе в зонах частичных тяговых нагрузок и на холостом ходу. Применение накопителей энергии (аккумуляторов) потребует увеличения массо-габаритных параметров поезда [1–13].
3. Пожаро- и взрывоопасность СПГ не соответствует безопасности его применения, так как при утечках пары СПГ собираются в нижней части кузова подвижной единицы, что требует постоянного контроля газовоздушного состояния под ПС и принудительного вентилирования» [5–13]. Для повышения безопасности газового оборудования турбопоездов, снижения утечек газа необходимо сокращать длину поездных газопроводов, применять на них сварные соединения вместо резьбовых, сокращать число фланцевых и ниппельных соединений, снижать число устройств, встроенных в газовые трубопроводы – термометров, датчиков давления, электромагнитных клапанов, вентилялей» [3–13].
4. Высокий уровень шума при работе ГТД. Затраты по шумоглушению (конструктивные и защитные) составляют до 6 % стоимости ГТД [1–5, 13]. Конструктивным мероприятием является создание двухконтурных газовых турбин: чем выше двухконтурность ГТД, тем ниже генерируемый им уровень шума. К защитным мероприятиям относится обшивка звукопоглощающими резонансными конструкциями (ЗПК). В диссипативных ЗПК энергия звуковой волны гасится за счет возбуждения вынужденных колебаний воздуха в замкнутых объемах резонаторов.
5. Высокая температура выхлопных газов ГТД может привести к перегосу контактного провода при работе турбопоездов на электрифицированных линиях, что потребует применения охладителей выхлопных газов.

Бортовой запас газа в одной криогенной емкости газотурбовоза ГТh1 составляет 40 т, что достаточно для дальности хода 1400 км [1–5, 13]. Экипировка газотурбопоездов возможна двумя способами:

- 1) заправка в борт криогенной установки со сливной эстакады;
- 2) использование съемных или подключаемых к криогенным продуктопроводам цистерн позволяет оперативно проводить дозаправку топлива [1–13].

Анализ основных показателей поездов автономной тяги (табл. 1) показал, что наибольшее количество баллов по результатам оценки набрали локомотивы с газотурбинной и газотурбинно-гибридной установкой.

Таблица 1

Балльная оценка основных параметров поездов автономной тяги

Параметр	Силовая установка				
	дизельная	газогенераторная	газодизельная	газотурбинная	газотурбинная+гибрид
Стоимость	2	2	2	3	1
Затраты на ТО и ремонт	1	1	2	3	3
Расход топлива	2	3	1	1	1
Стоимость топлива	1	3	2	3	3
Расход масла	1	2	2	3	3
Экологичность	1	1	2	3	3
Мощность	2	1	3	3	3
КПД	3	2	2	1	2
Масса-габаритные параметры	3	1	2	1	1
Итого	16	16	18	21	20

Создание турбопоездов на различных видах топлива осуществлялось в Канаде, США, Франции, СССР, России и т.д. Канада представила модульный семивагонный скоростной турбопоезд из алюминиевых сплавов полной массой 200 т. В головном вагоне поезда были установлены пять ГТД, мощностью 295 кВт каждый с механической передачей. Четыре ГТД работали для тяги поезда, один – для электроснабжения вагонов. Над турбоустановками располагалась кабина машиниста и пассажирские места. На испытаниях данный турбопоезд развил скорость 274 км/ч [13]. Во Франции создание ВСМ ориентировалось на применение газотурбинной тяги. Однако отказались от применения ГТД в пользу электротяги. В СССР в 1970 г. был построен ПС из двух головных моторных вагонов, оснащенных ГТД. На передней части крыши вагонов располагалась силовая установка из ГТД весом 135 кг, мощностью 662 кВт, и генератора, вырабатывающего ток частотой до 200 Гц. КПД поезда составлял 19 %. Расчетная скорость ПС – 200 км/ч [1–4].

В 2000 г. в США разработан дизельный газотурбопоезд со скоростью 250 км/ч, мощностью 3750 кВт, с частотой вращения 16 000 об/мин, тяговая передача переменного тока [13]. Индийские железные дороги эксплуатируют мотор-вагонные поезда и пассажирские локомотивы на СПГ. Экспериментальные локомотивы и мотор-вагонные поезда производились в Испании, Индонезии, США [2–4, 13].

Проведенный анализ показателя удельной массы / пассажиро-место высокоскоростного турбопоезда и других видов высокоскоростного ПС [1–5, 13] показывает, что газотурбинный поезд имеет сравнимое с высокоскоростными поездами значение удельного показателя массы/пассажиро-место при сопоставимой суммарной мощности газотурбинной установки 8,6 МВт и 10-вагонной составности.

### Заключение

Эксплуатация высокоскоростных мотор-вагонных автономных турбопоездов позволит снизить инвестиционные и эксплуатационные затраты, реализовать потенциал применения газомоторных двигателей в России, осуществить на единой транспортной инфраструктуре, в том числе электрифицированной, смешанное грузопассажирское движение с разными скоростями.

Для управления системами ПС с динамично изменяющимся состоянием нужны распределенные компьютерные системы, способные решать задачи в режиме реального времени с применением

интеллектуальных (адаптивных) методов управления, вычисления и обработки информации. Интеллектуальными узлами динамических систем контроля, диагностики управления ПС являются промышленные компьютеры и контроллеры, быстродействующие, бесконтактные датчики и импульсные исполнительные устройства.

Сложные, функционально насыщенные системы сбора и обработки технологической информации требуют применения датчиков, способных помимо выдачи сообщений об уровне сигналов или просто о включении-выключении элементов системы (оборудования) встраивать эти чипы во все меньшие по размерам изделия. Именно с изменением элементной базы электронных устройств обработки сигналов первичных преобразователей связано появление нового поколения датчиков, получивших название интеллектуальных.

### Список литературы

1. Технические характеристики высокоскоростных поездов. URL: <https://railtrain.pro/cat/mvps/vsps> (дата обращения: 31.03.2024).
2. Буйносов П. А., Лаптев С. И. Организация обслуживания и ремонта газотурбовозов GT1h на перспективном полигоне северного широтного хода // Вестник транспорта Поволжья. 2019. № 2. С. 16–21.
3. Носырев Д. Я., Карышев Д. Ю., Кабанов П. А., Новикова В. Н. Особенности применения переохлажденного сжиженного природного газа в энергетических установках локомотивов // Вестник СамГУПС. 2016. № 1. С. 33–35.
4. Зайцев А. А., Троицкий П. С. Мотор-вагонные грузовые электропоезда – альтернатива локомотивной тяге. Сравнение и анализ // Мир транспорта. 2019. № 17. С. 72–81. doi: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-72-81
5. Фофанов Г. А., Григорович Д. Н. Альтернативные виды топлива на подвижном составе железнодорожного транспорта. М. : Интекст, 2008. 144 с.
6. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Романенко Ю. А. Нанотехнологии и качество деталей транспортного машиностроения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 39–42.
7. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Кузин Н. А., Гусарова С. А. К вопросу диагностики наноматериалов в гибридных технологиях формообразования деталей в системе машиностроения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 447–449.
8. Жданов А. Г., Перевертов В. П., Новикова В. Н., Рыжов А. А. Эффективное крепление колесной техники на железнодорожной платформе // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2024. Т. 2. С. 39–42.
9. Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Качество формообразования деталей при интеграции гибридных технологий транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 72–80.
10. Перевертов В. П. Качество управления гибкими технологиями : монография. Самара : СамГУПС, 2019. 270 с.
11. Перевертов В. П. Материаловедение и гибкие технологии : учебник. Самара : СамГУПС, 2020. 230 с.
12. Перевертов В. П. Метрология. Стандартизация. Сертификация : учебник. Самара : СамГУПС, 2023. 242 с.
13. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Андрончев И. К. [и др.]. Анализ надежности применения газотурбинной тяги поездов высокоскоростных железнодорожных магистралей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2024. Т. 1. С. 42–47.
14. Перевертов В. П., Кузин Н. А. К вопросу безопасности движения транспортно-технологических систем и надежности технических средств // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 126–133.

### References

1. *Tekhnicheskie kharakteristiki vysokoskorostnykh poezdov = Technical characteristics of high-speed trains.* (In Russ.). Available at: <https://railtrain.pro/cat/mvps/vsps> (accessed 31.03.2024).
2. Buynosov P.A., Laptev S.I. Organization of maintenance and repair of GT1h gas turbine locomotives at the promising site of the northern latitudinal course. *Vestnik transporta Povolzh'ya = Bulletin of transport of the Volga region.* 2019;(2):16–21. (In Russ.)
3. Nosyrev D.Ya., Karyshev D.Yu., Kabanov P.A., Novikova V.N. Features of the use of supercooled liquefied natural gas in power plants of locomotives. *Vestnik SamGUPS = Bulletin of SamGUPS.* 2016;(1):33–35. (In Russ.)
4. Zaytsev A.A., Troitskiy P.S. Motor-car freight electric trains – an alternative to locomotive traction. Comparison and analysis. *Mir transporta = The world of transport.* 2019;(17):72–81. (In Russ.). doi: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-72-81
5. Fofanov G.A., Grigorovich D.N. *Al'ternativnye vidy topliva na podvizhnom sostave zheleznodorozhnogo transporta = Alternative fuels on railway rolling stock.* Moscow: Intekst, 2008:144. (In Russ.)
6. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Romanenko Yu.A. Nanotechnology and quality of parts of transport engineering. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2022;1:39–42. (In Russ.)

7. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Kuzin N.A., Gusarova S.A. On the issue of diagnostics of nanomaterials in hybrid technologies of forming parts in the mechanical engineering system. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:447–449. (In Russ.)
8. Zhdanov A.G., Perevertov V.P., Novikova V.N., Ryzhov A.A. Effective fastening of wheeled vehicles on a railway platform. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2024;2:39–42. (In Russ.)
9. Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. The quality of forming parts in the integration of hybrid technologies of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):72–80. (In Russ.)
10. Perevertov V.P. *Kachestvo upravleniya gibkimi tekhnologiyami: monografiya = Quality management of flexible technologies : monograph*. Samara: SamGUPS, 2019:270. (In Russ.)
11. Perevertov V.P. *Materialovedenie i gibkie tekhnologii: uchebnik = Materials science and flexible technologies : textbook*. Samara: SamGUPS, 2020:230. (In Russ.)
12. Perevertov V.P. *Metrologiya. Standartizatsiya. Sertifikatsiya: uchebnik = Metrology. Standardization. Certification : textbook*. Samara: SamGUPS, 2023:242. (In Russ.)
13. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Andronchev I.K. et al. Reliability analysis of gas turbine traction of high-speed railway trains. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2024;1:42–47. (In Russ.)
14. Perevertov V.P., Kuzin N.A. On the issue of traffic safety of transport and technological systems and reliability of technical means. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):126–133. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### **Валерий Петрович Перевертов**

кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры вагонного хозяйства  
и наземных транспортных комплексов,  
Приволжский государственный  
университет путей сообщения  
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В)  
E-mail: vpervertov@yandex.ru

#### **Николай Кондратьевич Юрков**

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

#### **Иван Константинович Андрончев**

доктор технических наук, профессор,  
директор Академии стандартизации,  
метрологии и сертификации  
(Россия, г. Москва, Волгоградский пр-т, 90)  
E-mail: rektoratSamgups@mail.ru

#### **Вера Николаевна Новикова**

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

#### **Valeriy P. Perevertov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
professor of the sub-department of carriage industry  
and ground transport complexes,  
Volga State Transport University  
(2V Svobody street, Samara, Russia)

#### **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)

#### **Ivan K. Andronchev**

Doctor of technical sciences, professor,  
director of the Academy of Standardization,  
Metrology and Certification  
(90 Volgogradsky avenue, Moscow, Russia)

#### **Vera N. Novikova**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of land transport and technological facilities,  
Volga State Transport University  
(2V Svobody street, Samara, Russia)

**Николай Андреевич Кузин**

студент,

Московский автодорожный институт

(технический университет)

(Россия, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64)

E-mail: sputnik1985nk3y@mail.ru

**Nikolai A. Kuzin**

Student,

Moscow Road Institute (Technical University)

(64 Leningradsky avenue, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 05.04.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 04.05.2025**