

НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

№ 3 (51) 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Дивеев А. И., Барабаш А. Д.

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА УНИВЕРСАЛЬНЫХ
СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ.....5

Годунов А. И., Шишков С. В., Саламон З.-А., Мельничук А. И., Алексеев А. В.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ВОПРОСАХ НАДЕЖНОСТИ
И КАЧЕСТВА РОБОТИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....17

Швед Ю. В.

ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО
КАЧЕСТВА КРЫЛА ПАРАПЛАНА.....26

Старостин И. Е.

ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ
СИСТЕМ МЕТОДАМИ DATA SCIENCE И МАТЕМАТИЧЕСКОГО
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....36

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Ирзаев Г. Х., Адамова А. А., Юрков Н. К.

МНОГОАГЕНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ИНЖЕНЕРНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ НА ПРЕДПРИЯТИИ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ45

Коваль А. А., Капустин Д. А., Короп Г. В., Онопченко С. В., Сентяй Р. Н., Швыров В. В.

ЛОКАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ПЕЛЕНГОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНО-КОНTRASTНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕГО КОНСТРУКЦИИ54

Григорьев А. С., Сафонова Н. Н., Тутнов И. А.

ЭКСПЕРТИЗА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ОБРАЩЕНИЯ
С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ.....70

Якимов А. Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ
НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ НА НАДЕЖНОСТЬ РАДИОСИСТЕМЫ82

Адамова А. А., Чен А. И., Апатенко А. В., Селиванов К. В.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ НА НАДЕЖНОСТЬ
И КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ91

Бадеева Е. А., Бадеев В. А., Мурашкина Т. И.	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРУПНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....	101

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Лепешкин А. Р., Аунг К. М.	
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ПРИ ИМИТАЦИИ УДАРА С ПТИЦЕЙ	110

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Masloboev A. V.	
A TERNARY CONCEPTUAL FRAMEWORK OF CRITICAL INFRASTRUCTURE RESILIENCE MANAGEMENT CYCLE	119

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Diveev A.I., Barabash A.D.

MACHINE LEARNING BASED ON SYMBOLIC REGRESSION
FOR AUTOMATED SYNTHESIS OF UNIVERSAL MOTION STABILIZATION SYSTEMS 5

Godunov A.I., Shishkov S.V., Salamon Z.-A., Melnichuk A.I., Alekseev A.V.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE ISSUES OF RELIABILITY
AND QUALITY OF ROBOTICS OF COMPLEX MILITARY SYSTEMS 17

Shved Yu.V.

PROBLEMS AND POSSIBILITIES OF MEASURING
THE AERODYNAMIC QUALITY OF A PARAGLIDER WING 26

Starostin I.E.

CONSTRUCTION OF ANALYTICAL MODELS OF VARIOUS PHYSICAL
AND CHEMICAL SYSTEMS BY METHODS OF DATA SCIENCE
AND MATHEMATICAL PROTOTYPING OF ENERGY PROCESSES 36

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Irzaev G.Kh., Adamova A.A., Yurkov N.K.

MULTI-AGENT SYSTEM FOR AUTOMATIC PLANNING AND MANAGEMENT
OF ENGINEERING CHANGES AT A RADIODEVICE ENTERPRISE 45

Koval A.A., Kapustin D.A., Korop G.V., Onopchenko S.V., Sentyay R.N., Shvyrov V.V.

A LOCAL SPATIAL POSITIONING SYSTEM FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE
BASED ON THE BEARING OF TEMPERATURE-CONTRASTING ELEMENTS OF ITS DESIGN 54

Grigoriev A.S., Safronova N.N., Tutnov I.A.

QUALITY PRODUCTS EXAMINATION AT CLOSED-CYCLE
INDUSTRIES NUCLEAR POWER PLANT STRUCTURAL MATERIALS 70

Yakimov A.N.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE ANTENNA RADIATION
PATTERN MAIN LOBE SHAPE ON THE RELIABILITY OF RADIO SYSTEM 82

Adamova A.A., Chen A.I., Apatenko A.V., Selivanov K.V.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF MANUFACTURABILITY
ON THE RELIABILITY AND QUALITY OF SPECIAL EQUIPMENT PRODUCTS 91

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

DESIGNING INTRINSICALLY SAFE FIBER-OPTIC SENSORS
FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF LARGE STRUCTURES 101

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

Lepeshkin A.R., Aung K.M.

CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHOD OF STUDYING THE STRESS-STRAIN
STATE OF A FAN BLADE WHEN SIMULATING AN IMPACT WITH A BIRD.....110

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Masloboev A.V.

A TERNARY CONCEPTUAL FRAMEWORK OF CRITICAL
INFRASTRUCTURE RESILIENCE MANAGEMENT CYCLE119

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 004.85;629.053
doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-1

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА УНИВЕРСАЛЬНЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ

А. И. Дивеев¹, А. Д. Барабаш²

^{1, 2} Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук, Москва, Россия

¹ Инженерная академия Российского университета дружбы народов, Москва, Россия
¹ aidiveev@mail.ru, ² artew44@gmail.com

Аннотация. Актуальность и цели. Рассматривается задача оптимального управления в расширенной постановке, ориентированной на обеспечение реализуемости решения в реальных условиях эксплуатации. Материалы и методы. Для достижения высокой точности и устойчивости движения объекта управления предлагается синтезировать универсальную систему стабилизации, способную обеспечивать надежное следование по траекториям из широкого класса, даже при наличии внешних воздействий и неопределенностей модели. Представлена концепция расширенной модели объекта управления, включающей как сам объект с системой стабилизации, так и эталонную модель для генерации оптимальной траектории. Показано, что при использовании такой структуры возможно применение классических методов оптимального управления для получения управляющей функции как функции времени, при этом достигается высокая степень соответствия движения объекта запланированной траектории при сохранении устойчивости и точности управления. Для синтеза универсальной системы стабилизации применяется машинное обучение на основе символьной регрессии, что позволяет формализовать процесс построения управляющих функций и исключить субъективные ошибки, характерные для ручного проектирования. Результаты и выводы. Эффективность предложенного подхода подтверждается вычислительным примером управления пространственным движением группы квадрокоптеров – типичного представителя сложных инженерных систем с высокими требованиями к надежности, маневренности и безопасности.

Ключевые слова: машинное обучение, символьная регрессия, система стабилизации движения, управление, синтез, модель, оптимальная траектория, точность управления

Для цитирования: Дивеев А. И., Барабаш А. Д. Машинное обучение на основе символьной регрессии для автоматизированного синтеза универсальных систем стабилизации движения // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 5–16. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-1

MACHINE LEARNING BASED ON SYMBOLIC REGRESSION FOR AUTOMATED SYNTHESIS OF UNIVERSAL MOTION STABILIZATION SYSTEMS

A.I. Diveev¹, A.D. Barabash²

^{1, 2} Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ Engineering Academy of the People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

¹ aidiveev@mail.ru, ² artew44@gmail.com

Abstract. *Background.* This study considers an optimal control problem in an extended formulation, aimed at ensuring the feasibility of the solution under real-world operating conditions. *Materials and methods.* To achieve high accuracy and stability of the controlled plant's motion, it is proposed to synthesize a universal stabilization system capable of reliably following a wide range of trajectories, even in the presence of external influences and model uncertainties. The concept of an extended model of the controlled plant is presented, including both the plant itself with the stabilization system and a reference model for generating the optimal trajectory. It is shown that using such a structure, classical optimal control methods can be applied to obtain the control function as a function of time, achieving a high degree of conformity between the plant's motion and the planned trajectory while maintaining stability and control accuracy. To synthesize the universal stabilization system, machine learning based on symbolic regression is used, which allows for the formalization of the process of constructing control functions and eliminates the subjective errors typical of manual design. *Results and conclusions.* The effectiveness of the proposed approach is confirmed by a computational example of controlling the spatial motion of a group of quadcopters – a typical example of complex engineering systems with high requirements for reliability, maneuverability, and safety.

Keywords: machine learning, symbolic regression, motion stabilization system, control, synthesis, model, optimal trajectory, control accuracy

For citation: Diveev A.I., Barabash A.D. Machine learning based on symbolic regression for automated synthesis of universal motion stabilization systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):5–16. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-1

Введение

Традиционный подход к решению задачи оптимального управления предполагает ее первоначальное решение в классической постановке, с последующим получением управляющей функции, зависящей исключительно от времени. Далее эта функция интегрируется в модель объекта управления для определения оптимальной траектории. Только после этого разрабатывается система стабилизации движения объекта вдоль найденной оптимальной траектории.

Однако подобный подход имеет существенные ограничения с точки зрения обеспечения надежности и качества функционирования сложных инженерных систем. Во-первых, система стабилизации движения неизбежно изменяет динамические свойства объекта, что приводит к несоответствию между моделью, использованной при расчете оптимального управления, и реальной системой, действующей с учетом стабилизации. В результате оптимальное управление, полученное без учета стабилизации, становится неэффективным, а в ряде случаев и нестабильным. Во-вторых, одной системе управления приходится одновременно обеспечивать как следование по оптимальной траектории, так и ее стабилизацию. При этом, например, при быстродействующих режимах компоненты вектора управления могут достигать граничных значений, не оставляя ресурса для корректировки траектории, что снижает устойчивость системы к внешним воздействиям и непредсказуемым отклонениям. В-третьих, хотя современные вычислительные средства позволяют решать задачу оптимального управления в реальном времени, задача синтеза стабилизирующего управления остается ресурсоемкой и практически не может быть решена оперативно в процессе функционирования системы, что критично для обеспечения надежности в динамических условиях [1, 2].

В работе [3] представлены различные методы решения расширенной задачи оптимального управления. Метод синтезированного управления предполагает предварительное решение задачи синтеза стабилизирующей системы до поиска оптимального управления, что обеспечивает более согласованную и устойчивую работу всей системы в реальных условиях. Качество полученного решения напрямую зависит от степени устойчивости объекта в пространстве состояний. Альтернативный подход – синтез управления вдоль заранее найденной траектории – требует повторного анализа и построения стабилизирующей функции для каждой новой траектории, что затрудняет масштабируемость и снижает надежность при множественных сценариях.

В теории управления накоплен значительный научный опыт построения систем стабилизации движения по заданной траектории [4–11]. Однако основным недостатком большинства таких решений остается ручная настройка, опирающаяся на экспертные знания: исследователь анализирует модель, определяет каналы управления и вручную встраивает регуляторы. Подобный подход хотя и способен обеспечить высокое качество управления при точной настройке, не масштабируется и не обеспечивает требуемый уровень автоматизации и воспроизводимости в условиях современных инженерных требований.

Современные задачи управления в сложных системах требуют полной автоматизации процесса построения надежных управляющих воздействий. В данной работе эта цель достигается путем применения машинного обучения на основе символьной регрессии. Символьная регрессия позволяет автоматически находить аналитическое выражение для функции стабилизации, минимизирующую

отклонение от заданной траектории. В отличие от ряда предыдущих работ, где стабилизирующие системы строились отдельно для каждой траектории, здесь предлагается синтез универсальной системы стабилизации, способной работать с различными управляющими функциями и обеспечивать устойчивость и повторяемость поведения системы при широком классе сценариев.

Полученная универсальная стабилизация интегрируется в модель объекта, образуя расширенную математическую модель, в которой эталонная подсистема отвечает за генерацию оптимальной траектории, а стабилизирующая подсистема – за надежное движение вдоль этой траектории. Благодаря такому разбиению задача оптимального управления решается в классической форме, с получением управляющей функции от времени, а требования к устойчивости, надежности и реализуемости управления выполняются на этапе синтеза стабилизации. Это позволяет повысить общую надежность системы управления и обеспечить ее применимость в инженерных задачах, где устойчивость, предсказуемость и автоматизация критичны.

Расширенная динамическая модель управляемого объекта

Расширенная модель необходима для эффективной реализации решения задачи оптимального управления. В связи с этим, прежде всего, представим постановку задачи оптимального управления в ее классической форме.

Постановка задачи оптимального управления

Представление математической модели управляемого объекта:

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

В контексте математической модели объекта управления определяются следующие ключевые элементы: \mathbf{x} – это вектор состояния объекта управления, где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$. Этот вектор описывает текущее состояние системы в n -мерном пространстве; \mathbf{u} – вектор управления, принадлежащий подмножеству U из \mathbb{R}^m , т.е. $\mathbf{u} \in U \subseteq \mathbb{R}^m$.

U представляет собой компактное множество, которое, как правило, определяет ограничения на управляющие воздействия

$$\mathbf{u}^- \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^+. \quad (2)$$

В данном выражении \mathbf{u}^- и \mathbf{u}^+ обозначают, соответственно, векторы нижних и верхних ограничений, накладываемых на управляющие воздействия.

Определяется исходное (3) и терминальное (4) состояние системы:

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0 = [x_1^0 \dots x_n^0]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}^f = [x_1^f \dots x_n^f]^T. \quad (4)$$

В данной постановке задачи t_f обозначает момент достижения конечного состояния (4). Как правило, точное значение этого терминального времени заранее не задается, но оно ограничено сверху, т.е. $t_f \leq t_f^+$, где t_f^+ представляет собой заданное предельное время управляющего процесса.

Определен критерий качества:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \rightarrow \min. \quad (5)$$

Необходимо определить управляющую функцию, которая зависит от времени:

$$\mathbf{u} = \mathbf{v}(t) \in U, t \in [0; t_f]. \quad (6)$$

После подстановки управляющей функции (6) в математическую модель объекта управления (1) формируется следующая система дифференциальных уравнений:

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

Полученная система будет обладать частным решением $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)$, исходящим из заданного начального состояния (3). Это решение должно обеспечивать достижение конечного состояния (4) с оптимальным значением заданного критерия качества (5).

Расширенная модель

Множество начальных состояний объекта задается как совокупность точек, соответствующих этим состояниям. Частное решение $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)$ математической модели объекта управления (7), полученное при использовании найденной оптимальной управляемой функции в правой части, представляет собой оптимальную траекторию в пространстве состояний. Для обеспечения движения объекта управления по этой оптимальной траектории необходимо разработать систему стабилизации движения:

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) \in U, \quad (8)$$

где \mathbf{x}^* – оптимальная траектория.

Для разработки системы стабилизации (8) требуется решить задачу синтеза управления. Рассмотрим далее постановку этой задачи применительно к системе стабилизации движения объекта по заданной траектории.

Математическая модель объекта управления (1) является исходной. Также заданы ограничения на управление (2).

Множество начальных состояний представлено как совокупность исходных точек в пространстве состояний:

$$X_0 = \{\mathbf{x}^{0,1}, \dots, \mathbf{x}^{0,K}\}, \quad (9)$$

где K – совокупность исходных состояний в рамках определенного множества.

Терминальное состояние (4) определено. Заданная траектория удовлетворяет следующему условию:

$$\mathbf{x}^*(t^+) = \mathbf{x}^f. \quad (10)$$

Требуется разработать такую систему управления, которая способна стабилизировать движение объекта вдоль всех заданных программных траекторий, независимо от начальных условий. При этом синтезируемая система должна обеспечивать минимизацию определенного критерия качества:

$$J_1 = \sum_{i=0}^K \int_0^{t_{f,i}} \mathbf{x}^*(t) - \mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i}) dt + p_1 \mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_{f,i}, \mathbf{x}^{0,i}) \rightarrow \min_{\mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})}. \quad (11)$$

В данном выражении p_1 представляет собой весовой коэффициент. Величина $t_{f,i}$ обозначает время достижения конечного состояния (4) из начального состояния \mathbf{x} . Это время определяется следующим уравнением:

$$t_{f,i} = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_{f,i}, \mathbf{x}^{0,i}) \leq \varepsilon, \\ t^+ & \text{в других случаях, } i \in \{1, \dots, K\}. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь ε представляет собой заданное малое положительное значение. Решение задачи синтеза управления с использованием множества траекторий и критерия качества позволяет разработать универсальную систему стабилизации движения объекта управления, способную поддерживать движение вдоль любых траекторий, принадлежащих определенному классу.

Предположим, что оптимальная траектория заранее неизвестна. В таком случае становится возможным построить универсальную систему стабилизации движения, ориентированную на траектории из некоторого класса. Для этого необходимо сформировать набор разнообразных траекторий и затем синтезировать такую систему стабилизации, которая обеспечит устойчивое движение вдоль любой траектории из заданного набора.

Множество траекторий определяется следующим образом:

$$T = \{\mathbf{x}^{*,1}, \dots, \mathbf{x}^{*,S}\}. \quad (13)$$

Здесь S обозначает общее количество траекторий в заданном множестве.

Для разработки универсальной системы стабилизации движения необходимо модифицировать функционал (13). В этот функционал требуется интегрировать компонент, отвечающий за стабилизацию относительно всех заданных траекторий. Таким образом, новый критерий качества будет иметь следующую форму:

$$J_2 = \sum_{i=0}^K \sum_{j=1}^S \left(\int_0^{t_i} \mathbf{x}^{*,j}(t) - \mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i}) dt + p_1 \mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_f, \mathbf{x}^{0,i}) \right) \rightarrow \min_{\mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})}. \quad (14)$$

Решение задачи синтеза с использованием заданного множества траекторий и критерия качества (14) позволяет получить систему стабилизации движения объекта управления, способную поддерживать движение вдоль любой траектории, принадлежащей определенному классу.

Расширенная математическая модель объекта управления состоит из двух отдельных математических моделей:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}^* &= f(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}), \\ \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})). \end{aligned} \quad (15)$$

Первая система является эталонной моделью, предназначеннной для генерации целевых траекторий.

Вторая система представляет собой модель объекта управления, оснащенную системой стабилизации движения, которая обеспечивает следование по траекториям, сгенерированным эталонной моделью.

Задача оптимального управления, использующая расширенную модель объекта управления, включает в себя саму расширенную модель (15), начальное состояние (3), терминальное состояние (4) и критерий качества (5).

В рамках этой задачи необходимо определить управляющую функцию в форме (6) для эталонной модели, т.е. для первой подсистемы расширенной модели. При этом расчет значения критерия качества выполняется с использованием вектора состояния объекта управления, полученного из второй подсистемы расширенной модели.

Применение символьной регрессии в машинном обучении для задач управления

Для решения задачи синтеза управления в автоматическом режиме особенно перспективным является применение символьной регрессии. Этот метод позволяет формализовано и воспроизведимо находить математическое выражение требуемой функции на основе заданного критерия, что критично для обеспечения надежности при разработке управляющих воздействий в сложных инженерных системах. Символьная регрессия представляет собой универсальный подход к аппроксимации функций, позволяющий получать устойчивые решения, не зависящие от наличия обучающей выборки. В отличие от нейросетевых методов, символьная регрессия требует лишь четкой формулировки критерия качества, что повышает прозрачность, интерпретируемость и доверие к полученным результатам – важные аспекты при внедрении в ответственные технические системы.

Основная идея метода заключается в кодировании математического выражения – функции в специализированную кодовую структуру, после чего осуществляется поиск оптимального варианта в пространстве кодов с использованием специально адаптированного генетического алгоритма. Алгоритм использует модифицированную операцию пересечения (crossing-over), обеспечивающую корректность и структурную целостность получаемых выражений. Это гарантирует надежность работы метода при многократных итерациях и увеличивает устойчивость итоговых решений к стохастическим и численным эффектам.

Первым и наиболее известным методом символьной регрессии является генетическое программирование [12], в котором функция представляется в виде вычислительного графа. В настоящее время разработан широкий спектр подходов, насчитывающий более двадцати различных алгоритмов. В данной работе применяется метод сетевого оператора, использующий ориентированный граф и принцип малых вариаций базового решения. Такой подход позволяет эффективно исследовать окрестность базовой функции и найти устойчивое решение, минимизирующее заданный функционал, при этом значительно сокращая вычислительные затраты.

Машинное обучение управлению с использованием символьной регрессии выполняется в полностью автоматическом режиме, что принципиально повышает надежность процесса проектирования и снижает зависимость от человеческого фактора. Исследователю не требуется анализировать модель объекта управления или вручную формировать каналы воздействия. Достаточно указать участок математической модели, где требуется управляющая функция, и алгоритм находит ее аналитическую форму, удовлетворяющую заданным требованиям. Это обеспечивает воспроизводимость и масштабируемость решений в инженерной практике, особенно при работе с системами, предъявляющими повышенные требования к надежности и качеству управления.

Более подробное описание решения задачи синтеза управления методом символьной регрессии представлено в работе [13].

Вычислительный эксперимент

Рассмотрим задачу оптимального управления пространственным движением группы, состоящей из четырех идентичных квадрокоптеров. Математическая модель каждого объекта управления описывается следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1^j &= x_4, \\ \dot{x}_2^j &= x_5, \\ \dot{x}_3^j &= x_6, \\ \dot{x}_4^j &= u_4^j \left(\sin(u_3^j) \cos(u_2^j) \cos(u_1^j) + \sin(u_1^j) \sin(u_2^j) \right), \\ \dot{x}_5^j &= u_4^j \cos(u_3^j) \cos(u_1^j) - g, \\ \dot{x}_6^j &= u_4^j \left(\cos(u_2^j) \sin(u_1^j) - \cos(u_1^j) \sin(u_2^j) \sin(u_3^j) \right),\end{aligned}\quad (16)$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,80665$, $j = 1, \dots, N$; N – число квадрокоптеров в системе, $N = 4$.

На значения вектора управления каждого квадрокоптера наложены следующие ограничения:

$$\mathbf{u}^- \leq \mathbf{u}^j \leq \mathbf{u}^+ = 10, \quad j = 1, \dots, N, \quad (17)$$

где

$$\mathbf{u}^- = [-\pi/12 \ -\pi \ -\pi/12 \ 0]^T, \quad (18)$$

$$\mathbf{u}^+ = [\pi/12 \ \pi \ \pi/12 \ 12]^T. \quad (19)$$

Заданы начальные состояния:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}^1(0) &= [050000]^T, \\ \mathbf{x}^2(0) &= [1050000]^T, \\ \mathbf{x}^3(0) &= [0510000]^T, \\ \mathbf{x}^4(0) &= [10510000]^T.\end{aligned}\quad (20)$$

Заданы терминальные состояния:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}^1(t_f) &= [10510000]^T, \\ \mathbf{x}^2(t_f) &= [0510000]^T,\end{aligned}\quad (21)$$

$$\mathbf{x}^3(t_f) = [1050000]^T,$$

$$\mathbf{x}^4(t_f) = [050000]^T.$$

Также заданы фазовые ограничения:

$$\varphi_i(\mathbf{x}^j) = r_i - \sqrt{(x_{1,i} - x_1^j)^2 + (x_{3,i} - x_3^j)^2} \leq 0, \quad (22)$$

где $i = 1, \dots, M$, M – количество фазовых ограничений, $M = 4$, $j = 1, \dots, N$, $N = 4$, $x_{1,1} = 2$, $x_{2,1} = 2$, $x_{3,1} = 2$, $x_{1,2} = 2$, $x_{2,2} = 2$, $x_{3,2} = 2$, $x_{1,3} = 8$, $x_{2,3} = 2$, $x_{3,3} = 2$, $x_{1,4} = 2$, $x_{2,4} = 2$, $x_{3,4} = 8$, $r_1 = 1,5$, $r_2 = 1,5$, $r_3 = 1,5$, $r_4 = 1,5$.

Динамические фазовые ограничения определяются как условия предотвращения столкновений между квадрокоптерами:

$$\chi(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) = r_0 - \sqrt{\sum_{k=1}^3 (x_k^i - x_k^j)^2} \leq 0, \quad (23)$$

где $i = 1, \dots, N$, $N - 1$, $j = i + 1, \dots, N$, $r_0 = 1,5$.

Задан критерий качества управления:

$$J_3 = t_f + p_1 \int_0^{t_f} \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^N \rho_5(\chi(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j)) dt \rightarrow \min_{\mathbf{u}^1, \dots, \mathbf{u}^N}, \quad (24)$$

где p_1, p_2 – весовые коэффициенты, $p_1 = 3$, $p_2 = 3$; t_f – величина, рассчитываемая из уравнения (12), с $\varepsilon = 0,05$, $t^+ = 6,4$; $\rho_5(z)$ – функция Хевисайда:

$$\rho_5(z) = \begin{cases} 1, & \text{если } z > 0, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (25)$$

Изначально задача оптимального управления была решена для одного квадрокоптера, начиная с заданного начального состояния и с учетом дополнительных фазовых ограничений. При этом модель квадрокоптера рассматривалась в форме (16), а начальные условия задавались в уравнениях (20).

Оптимальное управление аппроксимировалось в форме кусочно-линейной функции, зависящей от времени:

$$u_i = \begin{cases} u_i^+, & \text{если } v_i > u_i^+, \\ u_i^-, & \text{если } v_i < u_i^-, \\ v_i & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (26)$$

где $i = 1, \dots, m = 4$,

$$v_i(t) = d_{i+(j-1)m} + (d_{i+jm} - d_{i+(j-1)m}) \frac{t - j\Delta t}{\Delta t}, \quad (27)$$

$\Delta t = 0,4$, $i = 1, \dots, m = 4$, $j = 1, \dots, D$, D – количество интервалов,

$$D = t^+ / \Delta t = 6,4 / 0,4 = 16. \quad (28)$$

В задаче оптимального управления необходимо найти $D + 1 = 17$ значения для каждого управления $i = 1, \dots, m = 4$, которое в совокупности определяется $(D+1)m = 17 \cdot 4 = 68$ параметрами

$$\mathbf{d} = [d_1 \dots d_{68}]^T. \quad (29)$$

Для решения задачи оптимального управления был применен гибридный эволюционный алгоритм [14], в результате чего было получено два оптимальных решения. В дальнейшем была решена

задача синтеза управления и найдена управляющая функция в форме (8). Для решения этой задачи синтеза использовался метод сетевого оператора. В результате его работы было получено следующее математическое выражение для системы стабилизации:

$$h_i(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = \begin{cases} u_i^+, & \text{если } \tilde{h}_i(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) \geq u_i^+, \\ u_i^-, & \text{если } \tilde{h}_i(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) \leq u_i^-, \\ \tilde{h}_i(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}), & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (30)$$

где $i = 1, \dots, m = 4$,

$$\tilde{h}_1(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = \rho_1(F + \rho_1(q_3)), \quad (31)$$

$$\tilde{h}_2(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = \tilde{h}_1(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) - \tilde{h}_1^3(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}), \quad (32)$$

$$\tilde{h}_3(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = \rho_4(A + \rho_1(F + \rho_2(q_3))) + A^{-1} + \cos(G) + \rho_2(H), \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \tilde{h}_4(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = & \exp(\tilde{h}_3(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})) + \ln(|\tilde{h}_2(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})|) + \\ & + \operatorname{sgn}(A + \rho_1(F + \rho_2(q_3))) \sqrt{|A + \mu(F + \rho_2(q_3))|} + \rho_4(A) + \operatorname{sgn}(C) + \\ & + \arctan(W + \tanh(C)) + \arctan(D) + \rho_3(q_5(x_5^* - x_5)) + \exp(q_2(x_2^* - x_2)), \end{aligned} \quad (34)$$

$$A = B + \tanh(W) + \exp(E) + q_6 - q_6^3,$$

$$B = V + \operatorname{sgn}(W) \sqrt{|W|} + q_2^3,$$

$$V = \exp(W + \tanh(C)) + \cos(q_6(x_6^* - x_6)),$$

$$W = C + D + \sin(H),$$

$$C = D(F + \rho_2(q_3)) \arctan(E) - G,$$

$$D = E + \sqrt[3]{G} + \operatorname{sgn}(x_5^* - x_5) + (x_2^* - x_2)^3,$$

$$E = \rho_2(F) + G^3 + H + \rho_5(q_5(x_5^* - x_5)) + (x_5^* - x_5)^2,$$

$$F = q_6(x_6^* - x_6) + q_3(x_3^* - x_3),$$

$$G = \sin(q_6(x_6^* - x_6)) + q_5(x_5^* - x_5) + \sqrt[3]{q_2(x_2^* - x_2)} + \cos(q_1) + \rho_6(x_2^* - x_2),$$

$$H = q_4(x_4^* - x_4) + q_1(x_1^* - x_1) + \sin(q_5),$$

$$\rho_1(z) = \begin{cases} z, & \text{если } |z| < 1, \\ \operatorname{sgn}(z) \text{ в других случаях,} \end{cases}$$

$$\rho_2(z) = \operatorname{sgn}(z) \ln(|z| + 1),$$

$$\rho_3(z) = \operatorname{sgn}(z) \exp(|z| - 1),$$

$$\rho_4(z) = \operatorname{sgn}(z) \exp(-|z|),$$

$q_1 = 12,26636$, $q_2 = 3,85864$, $q_3 = 6,48047$, $q_4 = 14,10620$, $q_5 = 11,74170$, $q_6 = 11,74170$, $q_7 = 2,140639$.

На прилагаемых рисунках (рис. 1–4) представлены проекции оптимальных траекторий (29). Также показаны реальные пути квадрокоптеров в горизонтальной плоскости, полученные при работе системы стабилизации [15].

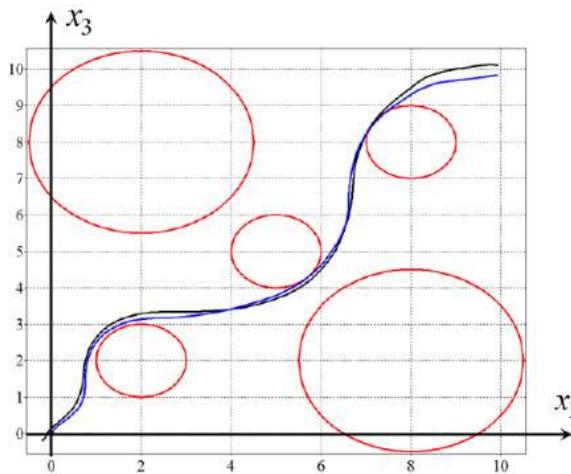


Рис. 1. Проекции первой оптимальной траектории (синяя линия) и реальной траектории движения объекта (черная линия) на горизонтальной плоскости

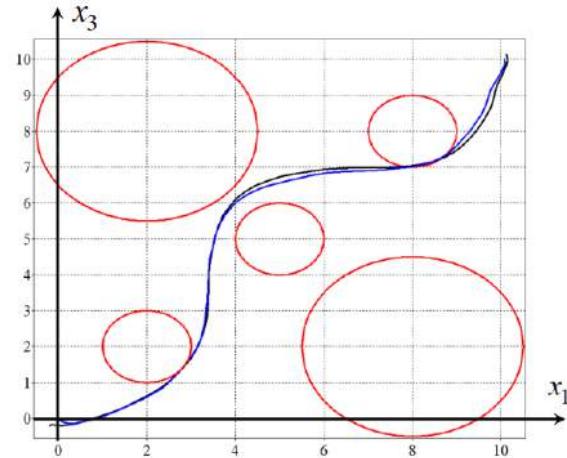


Рис. 2. Проекции второй оптимальной траектории (синий) и соответствующей ей реальной траектории движения (черный) на горизонтальную плоскость

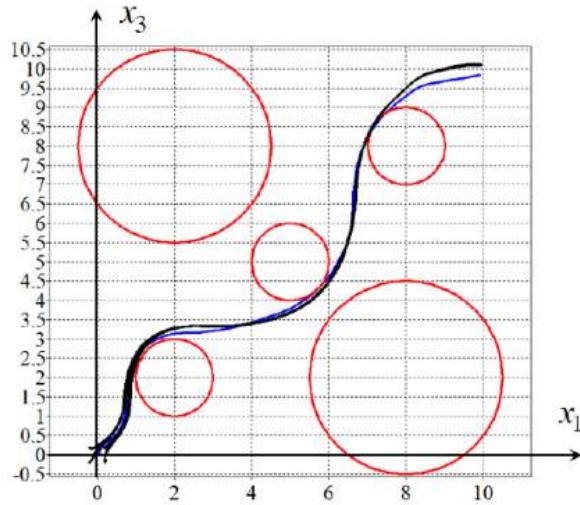


Рис. 3. Проекции первой оптимальной траектории (синий) и реальных траекторий движения (черный) на горизонтальной плоскости из восьми начальных состояний

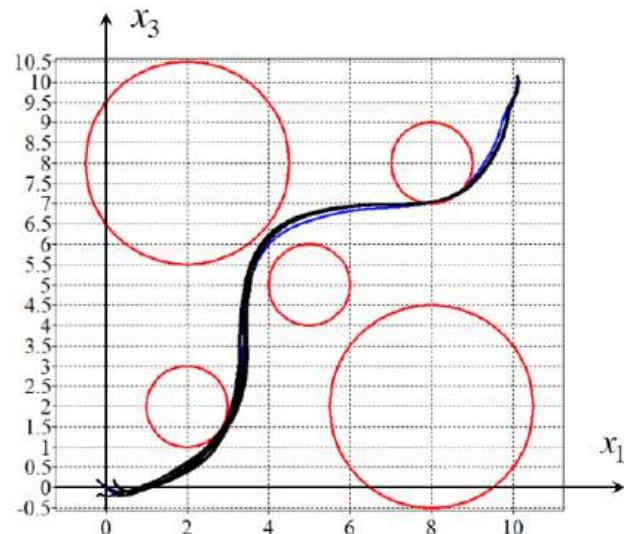


Рис. 4. Проекции второй оптимальной траектории (синий) и фактических траекторий (черный) на горизонтальную плоскость из восьми начальных состояний

Для оценки эффективности разработанной системы стабилизации (30) были выполнены симуляции управляющей системы с введением возмущений начальных состояний для двух оптимальных траекторий. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4.

На основе этой системы стабилизации была построена расширенная математическая модель объекта управления для исходной задачи оптимального управления:

$$\dot{x}_1^{j,*} = \dot{x}_4^{j,*},$$

$$\dot{x}_2^{j,*} = \dot{x}_5^{j,*},$$

$$\dot{x}_3^{j,*} = \dot{x}_6^{j,*},$$

$$\dot{x}_4^{j,*} = u_4^j \left(\sin(u_3^j) \cos(u_2^j) \cos(u_1^j) + \sin(u_1^j) \sin(u_2^j) \right), \quad (35)$$

$$\dot{x}_5^{j,*} = u_4^j \cos(u_3^j) \cos(u_1^j) \cos(u_1^j) - g,$$

$$\dot{x}_6^{j,*} = u_4^j \left(\cos(u_2^j) \sin(u_1^j) - \cos(u_1^j) \sin(u_2^j) \sin(u_3^j) \right),$$

$$\dot{x}_1^j = \dot{x}_4^j,$$

$$\dot{x}_2^j = \dot{x}_5^j,$$

$$\dot{x}_3^j = \dot{x}_6^j,$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4^j = h_4 \left(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j \right) & \left(\sin(h_3(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) \cos(h_2(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) \cos(h_1(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) + \right. \\ & \left. + \sin(h_1(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) \sin(h_2(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) \right), \end{aligned} \quad (36)$$

$$\dot{x}_5^j = h_4 \left(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j \right) \cos(h_3(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) \cos(h_1(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) - g,$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_6^j = h_4 \left(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j \right) & \left(\cos(h_2(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) \sin(h_1(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) - \cos(h_1(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) \times \right. \\ & \left. \times \sin(h_2(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) \sin(h_3(\mathbf{x}^{j,*} - \mathbf{x}^j)) \right), \end{aligned}$$

Как показывают результаты моделирования, решение задачи оптимального управления с использованием расширенной модели объекта управления позволяет получить реализуемую и надежную управляющую функцию, которая может быть непосредственно внедрена в реальный объект [16]. Такой подход обеспечивает не только соответствие расчетной и физической моделей, но и повышает устойчивость и качество функционирования системы управления в условиях реальной эксплуатации, включая возможные внешние возмущения и модельные неопределенности.

Заключение

В статье представлено решение задачи оптимального управления в классе реализуемых управляющих функций, что особенно важно для повышения надежности и функциональной устойчивости инженерных систем. Для получения такого решения в постановку задачи оптимального управления была интегрирована расширенная модель объекта, включающая эталонную подсистему генерации траектории и модель объекта управления с универсальной системой стабилизации, обеспечивающей точное и устойчивое движение по оптимальной траектории. Такое структурное разбиение позволяет гарантировать воспроизводимость поведения системы и соответствие управляющих воздействий реальным условиям эксплуатации.

Для синтеза системы стабилизации предложено использовать машинное обучение управлению на основе символьной регрессии, что обеспечивает автоматизацию процесса проектирования и высокое качество получаемых решений без привлечения ручной настройки. Это особенно ценно для критичных к надежности систем, работающих в условиях неопределенности и ограниченного ресурса вычислений.

Список литературы

- Понtryгин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкrelidze Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. Нью-Йорк ; Лондон ; Париж ; Монтере ; Токио : Gordon and Breach Science Publishers, 1985. Т. 4. 360 с.
- Годунов А. И., Ерофеев М. В., Мельничук А. И. [и др.]. Информационное поле обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в пространстве на основе нейронных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 5–14.
- Воронин Е. А. Применение технологий машинного обучения в задачах оценки и обеспечения надежности технических систем с учетом безопасности их работы // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 75–84.

4. Diveev A. Refined Optimal Control Problem and Its Solution Using Symbolic Regression // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. T. 507. P. 294–305.
5. Diveev A., Barabash A. The Extended Optimal Control Problem and Numerical Techniques of its Solving // Proceedings of 2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Rome, Italy, 2023.
6. Samir A., Hammad A., Hafez A., Mansour H. Quadcopter Trajectory Tracking Control using State-Feedback Control with Integral Action // International Journal of Computer Applications. 2017. Vol. 168. P. 1–7.
7. Walsh G., Tilbury D., Sastry S., [et al.]. Stabilization of trajectories for systems with nonholonomic constraints // IEEE Transactions on Automatic Control. 1994. Vol. 39. P. 216–222.
8. Uddin N. A Robot Trajectory Tracking Control System Design Using Pole Domination Approach // Proceedings of IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON). Vancouver, Canada, 2018. P. 506–512.
9. Pamosoaji A. K. Trajectory Tracking Control Strategy using Co-Reference for Rear-Steered Vehicle // Proceedings of 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). Nagoya, Japan, 2018. P. 74–78.
10. Andreev A., Peregudova O., Sutyrkina K., Filatkina E. On Global Output Feedback Trajectory Tracking Control of a Wheeled Mobile Robot // Proceedings of 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT). Salerno, Italy, 2019. P. 1–5.
11. Yu X., Zhu W., Xu L. Real-time Motion Planning and Trajectory Tracking in Complex Environments based on Bezier Curves and Nonlinear MPC Controller // Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Hefei, China, 2020. P. 1540–1546.
12. Zhao H., Su G., Yang. Anti-collision Trajectory Planning and Tracking Control based on MPC and Fuzzy PID Algorithm // Proceedings of the 2020 4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI). Hangzhou, China, 2020. P. 613–618.
13. Su T., Liang X., He G. [et al.]. Robust Trajectory Tracking of Delta Parallel Robot Using Sliding Mode Control // Proceedings of the IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Xiamen, China, 2019. P. 508–512.
14. Koza J. R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MIT Press, 1992. 819 p.
15. Diveev A. I., Shmalko E. Yu. Machine Learning Control by Symbolic Regression. Springer, Cham, Switzerland, 2021. 156 p.
16. Diveev A. I. Hybrid Evolutionary Algorithm for Optimal Control Problem // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. T. 543 LNNS. P. 726–738.

References

1. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov = Mathematical theory of optimal processes*. New York; London; Parizh; Montre; Tokio: Gordon and Breach Science Publishers, 1985;4:360. (In Russ.)
2. Godunov A.I., Yerofeyev M.V., Mel'nicuk A.I. et al. Information field of detection of small-sized unmanned aerial vehicles in space based on neural networks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):5–14. (In Russ.)
3. Voronin E.A. Application of machine learning technologies in the tasks of assessing and ensuring the reliability of technical systems, taking into account the safety of their operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):75–84. (In Russ.)
4. Diveev A. Refined Optimal Control Problem and Its Solution Using Symbolic Regression. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022;507:294–305.
5. Diveev A., Barabash A. The Extended Optimal Control Problem and Numerical Techniques of its Solving. *Proceedings of 2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. Rome, Italy, 2023.
6. Samir A., Hammad A., Hafez A., Mansour H. Quadcopter Trajectory Tracking Control using State-Feedback Control with Integral Action. *International Journal of Computer Applications*. 2017;168:1–7.
7. Walsh G., Tilbury D., Sastry S. et al. Stabilization of trajectories for systems with nonholonomic constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1994;39:216–222.
8. Uddin N. A Robot Trajectory Tracking Control System Design Using Pole Domination Approach. *Proceedings of IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. Vancouver, Canada, 2018:506–512.
9. Pamosoaji A.K. Trajectory Tracking Control Strategy using Co-Reference for Rear-Steered Vehicle. *Proceedings of 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*. Nagoya, Japan, 2018:74–78.
10. Andreev A., Peregudova O., Sutyrkina K., Filatkina E. On Global Output Feedback Trajectory Tracking Control of a Wheeled Mobile Robot. *Proceedings of 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT)*. Salerno, Italy, 2019:1–5.

11. Yu X., Zhu W., Xu L. Real-time Motion Planning and Trajectory Tracking in Complex Environments based on Bezier Curves and Nonlinear MPC Controller. *Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Hefei, China, 2020:1540–1546.
12. Zhao H., Su G., Yang. Anti-collision Trajectory Planning and Tracking Control based on MPC and Fuzzy PID Algorithm. *Proceedings of the 2020 4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*. Hangzhou, China, 2020:613–618.
13. Su T., Liang X., He G. et al. Robust Trajectory Tracking of Delta Parallel Robot Using Sliding Mode Control. *Proceedings of the IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. Xiamen, China, 2019:508–512.
14. Koza J.R. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press, 1992:819.
15. Diveev A.I., Shmalko E.Yu. *Machine Learning Control by Symbolic Regression*. Springer, Cham, Switzerland, 2021:156.
16. Diveev A.I. Hybrid Evolutionary Algorithm for Optimal Control Problem. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;543 LNNS:726–738.

Информация об авторах / Information about the authors

Асхат Ибрагимович Дивеев

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук;
руководитель отдела 55,
Управление робототехническими устройствами;
директор роботоцентра ФИЦ ИУ РАН,
Вычислительный центр имени А. А. Дородницына РАН
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40);
профессор департамента механики и мехатроники,
Инженерная академия
Российского университета дружбы народов
(Россия, г. Москва, ул. Орджоникидзе, 3)
E-mail: aidiveev@mail.ru

Askhat I. Diveev

Doctor of technical sciences, professor, chief researcher,
Federal Research Center "Computer Science
and Control" of the Russian Academy of Sciences,
head of department 55,
Control of Robotic Devices;
Director of the Robot Center of the FRC IU RAS,
Computing Center named after A.A. Dorodnitsyn RAS
(40 Vavilov street, Moscow, Russia);
professor of the department of mechanics
and mechatronics,
Engineering Academy of the People's
Friendship University of Russia
(3 Ordzhonikidze street, Moscow, Russia)

Артем Дмитриевич Барабаш

аспирант,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: artew44@gmail.com

Artem D. Barabash

Postgraduate student,
Federal Research Center "Computer Science
and Control" of the Russian Academy of Sciences
(40 Vavilov street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.08.2025

Поступила после рецензирования/Revised 15.09.2025

Принята к публикации/Accepted 30.09.2025

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ВОПРОСАХ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА РОБОТИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. И. Годунов¹, С. В. Шишков², З.-А. Саламон³, А. И. Мельничук⁴, А. В. Алексеев⁵

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

^{2, 3} Филиал Военной академии материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

⁵ Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

¹ avitelpgu@mail.ru, ² paii@mil.ru, ³ paii@mil.ru, ⁴ pelmenio@mail.ru, ⁵ antonvladim@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Применение роботизированных устройств с искусственным интеллектом в сложных системах военного назначения привело к появлению новых задач, решение которых значительно сложнее по сравнению с задачами предыдущего этапа совершенствования «человеко-машинного интерфейса». Авторами работы было проведено исследование по выявлению преимущества применения искусственного интеллекта в сложных системах военного назначения и оценки их надежности и качества при применении в боевых действиях. Материалы и методы. В исследовании использованы данные открытых отчетов к статистическим опросам разработчиков и пользователей роботизированных сложных систем военного назначения, отчетов об исследовании роботизированных устройств. Результаты. Даны формулировки уровней искусственного относительно естественного интеллекта, определена классификация роботизированных устройств, а также дана оценка надежности и качества применения искусственного интеллекта в сложных системах военного назначения при проведении боевых действий. Выводы. Искусственный интеллект и роботизация сложных систем военного назначения становятся неотъемлемой частью военной промышленности, обеспечивая значительные преимущества в области точности, скорости и безопасности военных операций и проведения боевых действий. Интеграция искусственного интеллекта в вопросы надежности и качества роботизации сложных систем военного назначения способствует улучшению военной силы и обеспечению преимущества на театре военных действий.

Ключевые слова: искусственный интеллект, военные роботизированные системы, роботизированные устройства, сложные системы военного назначения

Для цитирования: Годунов А. И., Шишков С. В., Саламон З.-А., Мельничук А. И., Алексеев А. В. Искусственный интеллект в вопросах надежности и качества роботизации сложных систем военного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 17–25. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-2

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE ISSUES OF RELIABILITY AND QUALITY OF ROBOTICS OF COMPLEX MILITARY SYSTEMS

A.I. Godunov¹, S.V. Shishkov², Z.-A. Salamon³, A.I. Melnichuk⁴, A.V. Alekseev⁵

^{1, 4} Penza State University, Penza, Russia

^{2, 3} Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

⁵ Volga State Transport University, Samara, Russia

¹ avitelpgu@mail.ru, ² paii@mil.ru, ³ paii@mil.ru, ⁴ pelmenio@mail.ru, ⁵ antonvladim@mail.ru

Abstract. Background. The use of robotic devices with artificial intelligence in complex military systems has led to the emergence of new problems, the solution of which is much more difficult compared to the tasks of the previous stage of improving the "human-machine interface". The authors of the work conducted a study to identify the advantages of using artificial intelligence in complex military systems and assess their reliability and quality when used in combat. **Materials and methods.** The study used data from open reports on statistical surveys of developers and users of robotic complex military systems, reports on the study of robotic devices. **Results.** The levels of artificial relative to natural intelligence are formulated, the classification of robotic devices is determined, and the reliability and quality of the use of artificial intelligence in complex military systems during combat operations are assessed. **Conclusions.** Artificial

intelligence and robotics of complex military systems are becoming an integral part of the military industry, providing significant advantages in the field of accuracy, speed and safety of military operations and combat operations. The integration of artificial intelligence into issues of reliability and quality of robotics of complex military systems contributes to the improvement of military force and provides an advantage in the theater of military operations.

Keywords: artificial intelligence, military robotic systems, robotic devices, complex military systems

For citation: Godunov A.I., Shishkov S.V., Salomon Z.-A., Melnichuk A.I., Alekseev A.V. Artificial intelligence in the issues of reliability and quality of robotics of complex military systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(3):17–25. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-2

Введение

Человек, имеющий наибольший мозг относительно размера всего тела в животном мире, является доминирующим видом на Земле, хотя мы не самые выносливые, стремительные и жизнестойкие. Но возможность интеллекта человека использовать подручные инструменты и способность приручать другие виды животных на основе умственного превосходства с древних времен дает преимущество с точки зрения охоты, собирательства и ведения войны.

И реалии, окружающие нас, заставляют задать вопрос: способен ли искусственный интеллект (ИИ) приручить человека, как он сам поступал на протяжении тысячелетий с другими видами? История возникновения искусственного интеллекта начинается еще в древности. Философы того времени стремились осознать интеллект человека. Например, Аристотель разработал «формальную логику», которая позже стала основой для алгоритмов [1]. И уже с начала XXI в. история создания искусственного интеллекта связана с развитием машинного обучения и обработки больших данных. Использование новых технологий – нейронных сетей – позволяет искусственному интеллекту обучаться самостоятельно на основе анализа больших данных, обеспечивающих пока человеком.

«Наш дом» – планета Земля – вступает в эру ведения боевых действий, которая будет напрямую зависеть от решений, принятых современным искусственным интеллектом. Подобные системы имеют официальное название «Смертоносные автономные системы вооружений» (Lethal Autonomous Weapons Systems, LAWS), но чаще их называют просто «роботами-убийцами» [2–4].

Искусственный интеллект

«Искусственный интеллект – это область компьютерной науки, которая занимается разработкой и созданием систем, способных выполнять задачи, требующие интеллектуальных способностей. Эти системы основаны на алгоритмах и моделях, которые позволяют им обрабатывать информацию, обучаться на основе опыта и принимать решения» [2–5].

«Искусственный интеллект может быть реализован различными способами, включая машинное обучение, нейронные сети, экспертные системы, генетические алгоритмы и многое другое» [2–5].

«Цель искусственного интеллекта – создание компьютерных систем, которые могут выполнять сложные задачи, ранее считавшиеся прерогативой человека». «Искусственный интеллект основан на компьютерных алгоритмах и программировании, в то время как естественный интеллект – это результат биологической эволюции и функционирования человеческого мозга». Искусственный интеллект имеет ограниченные области применения и способности, а естественный интеллект обладает широким спектром способностей, включая абстрактное мышление, творчество и эмоциональные реакции [2–5].

В настоящее время искусственный интеллект развивается дальше, изменения разнообразные сферы деятельности человека и взаимосвязь «человека и машины». Вместе с тем человек сталкивается с комплексом вопросов, относящихся к соблюдению нравственных стандартов или норм. Главная задача – обеспечение защищенности человека и информационная безопасность при создании и применении систем на основе искусственного интеллекта. Нарушения безопасности данных и конфиденциальности в настоящее время нарастают, что заставляет перейти к более строгим регуляциям и действиям по защите информации.

Урегулирование этических вопросов следует проводить в совместной работе самих этиков, технических специалистов искусственного интеллекта и военных специалистов, политиков и других участников, непосредственно связанных с этими вопросами.

Вместе с тем искусственный интеллект повышает беспокойство в отношении сокращения рабочих мест и экономического расслоения общества, хотя с нашим дефицитом рабочих профессий стоит проблема быстрого переобучения людей и урегулирования региональных заработанных плат

для устранения социальных и экономических неравенств в обществе. В настоящее время необходимо заменять «нелегальных мигрантов» на робототехнические комплексы.

Бурное развитие искусственного интеллекта создает тревогу по поводу его воздействия на кибербезопасность, что вызывает необходимость межгосударственного взаимодействия и этического регулирования.

К главным понятиям искусственного интеллекта (в международных обозначениях) следует отнести: искусственный интеллект (AI – Artificial Intelligence); машинное обучение (ML – Machine Learning) – раздел AI; наука о данных (DS – Data Science) [2–5].

Искусственный интеллект распределяется на следующие уровни:

- уровень 0 – «нет искусственного интеллекта» (начальный уровень компьютерных программ, без функции адаптации и самообучения, например, калькуляторы);

- уровень 1 – нижний уровень иерархии – «слабый – развивающийся искусственный интеллект» (уровень человека без специальных навыков и даже лучше, где применяются нейронные сети, алгоритмы и формы эволюционирующих вычислений, обеспечивающие понимание процессов адаптации, восприятия, воплощения и взаимодействия с окружающим физическим миром);

- уровень 2 – «средний – компетентный искусственный интеллект» (решает задачи на уровне среднего взрослого (не выдающегося, но компетентного сотрудника), где применяются шаблоны логического вывода, где рассматриваются и изучаются схемы дедукции, абдукции, индукции, поддержки истинности, а также другие многочисленные модели и принципы рассуждений);

- уровень 3 – высший уровень – «сильный – экспертный искусственный интеллект» – это сам разум, превосходящий человеческий. Создаваемый сегодня ИИ подразумевает любую деятельность компьютера, имитирующую человеческий интеллект; сильный ИИ – только такую, которая претендует на что-то универсально общее, похожее на то, как мыслит человек;

- уровень 4 – «виртуозный искусственный интеллект» – достигает высот мастерства, превосходящего навыки 99 % взрослых людей, который намного умнее лучших человеческих умов практически в любой сфере, в том числе научного творчества и социальных навыков;

- уровень 5 – «сверхчеловеческий искусственный интеллект». На пятом уровне искусственный интеллект выходит за пределы человеческих возможностей и может решать задачи, недоступные человеку.

Большие данные – большой объем структурированных и неструктурированных данных в цифровом виде, характеризующийся объемом, скоростью изменения и разнообразием. Для обработки больших данных могут применяться специализированные программные инструменты, такие как Apache Hadoop / Storm / Spark, Kaggle, СУБД класса NoSQL [2–5]. Переработанный, упорядоченный и размеченный набор данных, извлеченный из релевантного массива больших данных, служит неотъемлемым и важным элементом для машинного обучения в современных военных системах.

Нейронная сеть – взаимосвязанное множество искусственных нейронов, выполняющих простые логические операции, обладающие способностью машинного обучения.

Схематично зависимость основных определений представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема взаимосвязи искусственного интеллекта с машинным обучением

Из рис. 1 следует, что машинное обучение – это раздел искусственного интеллекта. «Машинное обучение – это техника обучения информационной системы на основе предоставленных наборов данных без использования предопределенных правил, является частным случаем искусственного интеллекта. Общей задачей машинного обучения является построение алгоритма (программы) на основании предоставленных входных данных и заданных верных/ожидающихся результатов: таким образом, процесс работы ML-системы разделен на первоначальное обучение на предоставляемых наборах данных и на последующее принятие решений уже обученной системой» [5].

В настоящее время существует несколько способов машинного обучения:

- контролируемое (обучение с учителем);
- неконтролируемое (обучение без учителя);
- частично контролируемое;
- обучение с подкреплением;
- самообучение;
- трансферное обучение.

Контролируемое обучение или обучение с учителем – способ машинного обучения, в котором используются размеченные наборы данных (проклассифицированные объекты с выделенными характерными признаками), для которых некий «учитель» (человек или обучающая выборка) указывает правильные пары «вопрос–ответ», на основании чего требуется построить алгоритм предоставления ответов на дальнейшие аналогичные вопросы.

«Неконтролируемое обучение или обучение без учителя – способ машинного обучения, в котором не используются размеченные наборы данных, не указаны правильные пары «вопрос–ответ», а от информационной системы требуется на основании известных свойств объектов найти различные взаимосвязи между ними» [5].

«Частично контролируемое обучение или обучение с частичным привлечением учителя – способ машинного обучения, в котором комбинируется небольшое количество размеченных наборов данных и большое количество неразмеченных. Такой подход оправдан тем, что получение качественных размеченных наборов данных является достаточно ресурсоемким и длительным процессом» [5].

«Обучение с подкреплением – частный случай обучения с учителем, при котором «учителем» является среда функционирования, дающая обратную связь информационной системе в зависимости от принятых ею решений. При этом в машинном обучении могут использоваться и другие алгоритмы, такие как байесовские сети, цепи Маркова, градиентный бустинг» [5].

Самообучение – это обучение, при котором испытуемая система спонтанно обучается выполнять поставленную задачу без вмешательства со стороны экспериментатора. При этом модель самостоятельно обучается на неразмеченных данных, чтобы проставлять собственные метки. Так работают, например, алгоритмы, которые подсказывают следующее слово при наборе текста на смартфоне.

Трансферное обучение – наиболее сложный способ, который предполагает обучение модели на одном типе задач, а использование – на другом. Такой подход экономит ресурсы, так как модель не приходится учить всему с нуля.

Глубокое обучение – это частный случай машинного обучения, в котором используется сложная многослойная искусственная нейронная сеть для эмуляции работы человеческого мозга и обработки речи, звуковых и визуальных образов. Машинное зрение в настоящее время широко используется в системах обеспечения безопасности, контроля транспорта и пассажиров. Системы обработки речи и распознавания слов помогают голосовым ассистентам «Сири» или «Алисе» отвечать на вопросы пользователей [5].

Роботизация

Согласно ГОСТу робот – программируемый исполнительный механизм с определенным уровнем автономности для выполнения перемещения, манипулирования или позиционирования [6].

Робототехническое устройство – исполнительный механизм, обладающий характеристиками промышленного робота или сервисного робота, но не имеющий либо необходимого числа программируемых степеней подвижности, либо некоторой степени автономности [6].

Робототехнический комплекс – комплекс, состоящий из одного или нескольких роботов, их рабочих органов и любых механизмов, оборудования, приборов или датчиков, обеспечивающих выполнение роботом функционального назначения (задания) [6].

Классификация роботов может проводиться по разным признакам, приведенным ниже [6].

По характеру выполнения технологических операций:

- технологические (выполняют основные технологические операции);
- вспомогательные (например, подъемно-транспортные, которые выполняют функции переноса объекта в вертикальной и горизонтальной плоскостях);
- универсальные (выполняют разнообразные технологические операции – основные и вспомогательные).

По степени специализации:

- специальные – только для выполнения одной технологической операции или обслуживания конкретного технологического оборудования;
- специализированные – для выполнения технологических операций одного вида;
- многоцелевые – для выполнения различных основных и вспомогательных операций.

По системе основных координатных перемещений:

- прямоугольная: плоская, пространственная;
- полярная: плоская, цилиндрическая, сферическая.

По числу степеней подвижности:

- с одной степенью подвижности;
- двумя степенями подвижности;
- n степенями подвижности.

По грузоподъемности:

- сверхлегкие – до 1 кг;
- легкие – до 10 кг;
- средние – до 200 кг;
- тяжелые – до 1000 кг;
- сверхтяжелые – свыше 1000 кг¹.

Таким образом, робот – это автоматическое устройство, которое за счет конкретной интегрированной программы может исполнять за человека некоторые или все мыслительные и телесные задачи. Всем известны бытовые или сервисные роботы, которые помогают человеку в каждый день по хозяйству – персональные (роботы-пылесосы, кухонные роботы и т.д.) или на работе – профессиональные (роботы-консультанты, роботы-гиды и т.д.) [7].

В последнее время активно используются боевые роботы, которые являются универсальными техническими устройствами, принимающими участие в боевых действиях. На СВО активно используются воздушные, наземные и морские роботы, например, многофункциональная дистанционно управляемая платформа «Депеша», которая управляется одним оператором и способна быстро и незаметно доставлять на передний край провизию, боеприпасы, топливо и эвакуировать раненых солдат. Еще гусеничный робот «Каракал», который управляется оператором на расстоянии 2 км, способен нести на себе 500 кг с запасом хода в 150 км. Маневренный и компактный «Каракал» может перевозить грузы, эвакуировать раненых, выполнять огневую поддержку. Их всех можно отнести к роботизированным сложным системам военного назначения, работающим как с помощью операторов с поддержкой искусственного интеллекта при принятии решения, так и без участия человека – автономное оружие [8].

Сложные системы военного назначения

Искусственный интеллект используется военными и оборонными организациями различными способами: кибербезопасность, логистика и транспорт, распознавание целей, медицинское обслуживание, моделирование боевых действий и обучение солдат. На рис. 2 приведены распространенные сценарии использования искусственного интеллекта.

Из рис. 2 следует, что для обеспечения поддержания ситуационной осведомленности в режиме реального времени и в моменте детектирования угроз применяются алгоритмы искусственного интеллекта, которые необходимы для обработки больших объемов данных из многообразных источников от датчиков военных приборов до спутников. С целью прогнозирования технического обслуживания использование алгоритмов искусственного интеллекта значительно сокращает время простоя вооружения и военной техники и тем самым повышает обороноспособность военного подразделения

¹ ГОСТ Р 60.0.0.4 – 2019/ ISO 8373:2012. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения.

в целом на основе быстрого определения неисправности и необходимых запасных частей. Аналогично алгоритмы искусственного интеллекта применяются в кибербезопасности, базирующейся на изобличении и предупреждении кибератак противника. К основному сценарию использования искусственного интеллекта необходимо также отнести способность оказания помощи в принятии решения, когда в условиях постоянного стресса и высокого риска человеку необходима рекомендация в режиме реального времени, а также для исключения человека от управления средствами поражения или вооружением и военной техникой в целом [9].



Рис. 2. Некоторые распространенные сценарии использования алгоритмов искусственного интеллекта

На рис. 3 приведены некоторые возможные последствия применения искусственного интеллекта в военных целях.



Рис. 3. Некоторые возможные последствия применения искусственного интеллекта в военных целях

Из рис. 3 следует, что последствия применения искусственного интеллекта в военных целях могут привести к повышенной летальности, так как использование оружия, работающего на алгоритмах искусственного интеллекта, приведет к гораздо большему числу человеческих жертв, чем традиционное оружие (причина кроется в точности попадания этого оружия и, соответственно, фатальностью). Также искусственный интеллект может применяться для изобретения новых форм ведения войны с использованием роботов или киберпространства. Использование искусственного интеллекта в военных конфликтах и боевых действиях может бросить вызов действующему международному праву.

Таким образом, применение искусственного интеллекта в сложных системах военного назначения имеет следующие преимущества:

- увеличение точности и эффективности военных операций на основе улучшения точности наведения оружия, рациональному выбору маршрутов и маневров, что приводит к снижению потерь и повышению эффективности операций;
- анализ огромных объемов данных и принятие решений в реальном времени при быстроизменяющихся условиях ведения боевых действий с целью предоставления информации человеку;

- уменьшение человеческого фактора на основе автоматизации сложных процессов;
- улучшение безопасности личного состава и гражданского населения с целью предотвращения проникновения на территорию диверсионных и террористических групп;
- сокращение времени и затрат на организацию и проведение боевых действий и эффективное распределение резервов и материально-технического обеспечения [10].

Надежность и качество роботизации сложных систем военного назначения на основе использования искусственного интеллекта

Искусственный интеллект играет важную роль в вопросах надежности и качества сложных систем военного назначения, в повышении точности прогнозирования дефектов и сбоев в работе вооружения и военной техники, что позволяет прогнозировать возможные риски и принять меры к их устранению.

Искусственный интеллект выполняет ряд монотонных заданий, таких как сбор огромных данных, анализ отчетов и отслеживание стандартов качества, что облегчает деятельность человека.

Алгоритмы искусственного интеллекта анализируют данные об использовании вооружения и военной техники и могут прогнозировать, когда какие устройства будут требовать ремонта или технического обслуживания.

С целью развития внедрения искусственного интеллекта в управление качеством в сложных системах военного назначения рекомендуется этому обучать в учебных заведениях курсантов, развивать инфраструктуру для их качественного обучения.

При этом надежность искусственного интеллекта означает его способность работать стабильно и предсказуемо в разнообразных вариантах применения. Сложная система военного назначения, основанная на использовании искусственного интеллекта, должна быть способна делать верные прогнозы или принимать некоторые решения исходя из доступных данных.

Невзирая на достоинства применения искусственного интеллекта, плохая надежность, возможно, приведет к тяжелым последствиям. Ошибки и неправильные решения в прогнозах или в обработке больших данных могут причинить вред человеку и эксплуатации сложных систем военного назначения. Для гарантирования надежности искусственного интеллекта целесообразно использовать разнообразные действия по обеспечению качества сложных систем военного назначения, что содержит в себе обоснованное тестирование и верификацию сложной системы военного назначения, а также учет свойств конкретного сценария боевых действий или обеспечения таковых. Таким образом, искусственный интеллект в процессе роботизации сложных систем военного назначения должен быть полезным и надежным в реальных условиях эксплуатации.

Также важным аспектом надежности искусственного интеллекта в процессе роботизации сложных систем военного назначения является его возможность к самообучению и адаптации. Если система может исправлять свои алгоритмы и прогнозы в зависимости от новых данных, это повышает ее надежность и возможность адаптироваться к меняющимся условиям ведения боевых действий.

Таким образом, надежность и качество роботизации сложных систем военного назначения на основе использования искусственного интеллекта являются критически важным фактором для его успешного применения. Чтобы искусственный интеллект был удобным и эффективным, необходимо обеспечить его надежность, тестируя и адаптируя систему в соответствии с конкретными сценариями ведения боевых действий и их обеспечения.

Заключение

В заключение можно отметить, что применение искусственного интеллекта в вопросах надежности и качества роботизации сложных систем военного назначения имеет большой потенциал для создания современных и оригинальных решений. Использование искусственного интеллекта позволяет снизить человеческий фактор ошибок, оптимизировать повторяющиеся задачи и роботизировать процессы ведения боевых действий. Тем не менее при внедрении искусственного интеллекта нужно брать во внимание моральные и общесоциальные особенности, а также поддерживать надежность и качество роботизации сложных систем военного назначения.

Искусственный интеллект и роботизация сложных систем военного назначения становятся неотъемлемой частью военной промышленности, обеспечивая значительные преимущества в области точности, скорости и безопасности военных операций и проведении боевых действий. Интеграция

искусственного интеллекта в вопросы надежности и качества роботизации сложных систем военного назначения способствует улучшению военной силы и обеспечению преимущества на театре военных действий.

Список литературы

1. Алябьева В. Г. От логики формальной до логики символической // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2017. № 2. С. 69–76.
2. Прокурина Д. С., Хохлова М. И., Сафин Н. И. Смертоносные автономные системы вооружений: будущее военной индустрии или угроза падения международного гуманитарного права? // Евразийская адвокатура. 2020. № 6. С. 81–85.
3. Петрова Д. А., Гайворонская Я. В., Мамычев А. Ю. Смертоносные автономные системы: этические, юридические, политические проблемы и перспективы их решения // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета. 2019. № 4. С. 33–45.
4. Степанов А. А. Искусственный интеллект в зарубежных армиях // Зарубежное военное обозрение. 2021. № 1. С. 21–27.
5. Менчиков А. А., Кармановский Н. С. Киберустойчивость систем искусственного интеллекта : учеб.-метод. пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2024. 52 с.
6. Юрьевич Е. И. Основы робототехники : учеб. пособие. 4-е изд. перераб. и доп. СПб. : БХВ-Петербург, 2018. 304 с.
7. Гарбук С. В. Метод оценки влияния параметров стандартизации на эффективность создания и применения систем искусственного интеллекта // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 3. С. 4–14.
8. Щербаков Е. В., Иванюха А. А., Лучников И. В. Применение искусственного интеллекта в автоматизированных системах управления // Научный лидер. 2023. № 38. С. 104–106.
9. Адамова А. А. Интеллектуальные методы системного управления технологичностью // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2024. Т. 1. С. 120–127.
10. Годунов А. И., Куканов С. А., Суздал'цев П. С. Навигационные элементы полета беспилотного летательного аппарата // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2024. Т. 1. С. 104–111.

References

1. Alyab'yeva V.G. From formal logic to symbolic logic. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer science.* 2017;(2):69–76. (In Russ.)
2. Proskurina D.S., Khokhlova M.I., Safin N.I. Lethal autonomous weapons systems: the future of the military industry or the threat of the fall of international humanitarian law? *Yevraziyskaya advokatura = The Eurasian Legal Profession.* 2020;(6):81–85. (In Russ.)
3. Petrova D.A., Gayvoronskaya Ya.V., Mamychev A.Yu. Lethal autonomous systems: ethical, legal, political problems and prospects for their solution. *Territoriya novykh vozmozhnostey. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta = The territory of new opportunities. Bulletin of Vladivostok State University.* 2019;(4): 33–45. (In Russ.)
4. Stepanov A.A. Artificial intelligence in foreign armies. *Zarubezhnoye voyennoye obozreniye = Foreign Military Review.* 2021;(1):21–27. (In Russ.)
5. Menshchikov A.A., Karmanovskiy N.S. *Kiberustoychivost' sistem iskusstvennogo intellekta: ucheb.-metod. posobiye = Cyber stability of artificial intelligence systems : an educational and methodological guide.* Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2024:52. (In Russ.)
6. Yurevich E.I. *Osnovy robototekhniki: ucheb. posobiye. 4-e izd. pererab. i dop. = Fundamentals of robotics : a textbook. 4th ed. revision. and additional.* Saint Petersburg: BKHV-Peterburg, 2018:304. (In Russ.)
7. Garbuk S.V. A method for assessing the impact of standardization parameters on the effectiveness of creating and applying artificial intelligence systems. *Informatsionno-ekonomicheskiye aspeki standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya = Information and economic aspects of standardization and technical regulation.* 2022;(3):4–14. (In Russ.)
8. Shcherbakov E.V., Ivanyukha A.A., Luchnikov I.V. Application of artificial intelligence in automated control systems. *Nauchnyy lider = Scientific leader.* 2023;(38):104–106. (In Russ.)
9. Adamova A.A. Intelligent methods of system technology management. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2024;1:120–127. (In Russ.)
10. Godunov A.I., Kukanov S.A., Suzdal'tsev P.S. Navigation elements of an unmanned aerial vehicle flight. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2024;1:104–111. (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)

Сергей Викторович Шишков

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры военных приборов,
Филиал Военной академии
материально-технического
обеспечения имени генерала армии
А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: paii@mil.ru

Sergey V. Shishkov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of military devices,
Branch of the Military Academy
of Logistics named after Army General
A.V. Khrulev in Penza
(Military town, Penza, Russia)

Зайн-Алабдин Саламон

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

Zain-Alabdin Salamon

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

Антон Иванович Мельничук

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

Anton I. Melnichuk

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

Антон Владимирович Алексеев

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

Anton V. Alekseev

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 20.08.2025

Поступила после рецензирования/Revised 10.09.2025

Принята к публикации/Accepted 21.09.2025

ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА КРЫЛА ПАРАПЛАНА

Ю. В. Швед

Московский авиационный институт, Москва, Россия
yuriy-shved@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Описаны проблемы измерения аэродинамического качества крыла параплана, измерения аэродинамического качества систем с мягким крылом на стропном подвесе. Дано сравнение опробованных способов измерения и их результатов. Показано, что способ одновременного измерения воздушной скорости и скорости изменения барометрической высоты не позволяет оценить аэродинамические качества. Материалы и методы. Предложен метод раздельного измерения аэродинамического качества мягкого крыла и подвешиваемого на нем груза путем установки датчиков углового положения к дополнительному звену (звеньям) между карабином наземного снаряжения и свободными концами крыла. Результаты и выводы. Обосновано, что установка датчиков углового положения на соединительных звеньях может оказаться полезной для беспилотных и опционально управляемых систем с мягким крылом, поскольку позволяет контролировать крыло в процессе выведения и резких эволюций, что позволяет осуществлять активную стабилизацию полета. Даны оценка точности и информативности предложенного метода.

Ключевые слова: параплан, планирующий парашют, мягкое крыло, аэродинамическое качество крыла

Для цитирования: Швед Ю. В. Проблемы и возможности измерения аэродинамического качества крыла параплана // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 26–35. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-3

PROBLEMS AND POSSIBILITIES OF MEASURING THE AERODYNAMIC QUALITY OF A PARAGLIDER WING

Yu.V. Shved

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia
yuriy-shved@mail.ru

Abstract. *Background.* The article describes the problems of measuring the aerodynamic quality of the wing of a paraglider, measuring the aerodynamic quality of systems with a soft wing on a sling suspension. A comparison of the tested methods of measurement and their results is given. It is shown that the method of simultaneous measurement of air speed and the rate of change of barometric altitude does not allow to evaluate the aerodynamic qualities. *Materials and methods.* A method of separate measurement of the aerodynamic quality of a soft wing and the load suspended on it by installing angular position sensors to an additional link (links) between the carabiner of ground equipment and the free ends of the wing is proposed. *Results and conclusions.* It is substantiated that the installation of angular position sensors on the connecting links can be useful for unmanned and optionally controlled soft-wing systems, as it allows for the control of the wing during takeoff and sharp evolutions, which enables active flight stabilization. The accuracy and informativeness of the proposed method have been evaluated.

Keywords: paraglider, gliding parachute, soft wing, wing aerodynamic quality

For citation: Shved Yu.V. Problems and possibilities of measuring the aerodynamic quality of a paraglider wing. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):26–35. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-3

Введение

Аэродинамическое качество является одним из базовых параметров, характеризующих совершенство летательного аппарата. Экспериментально полученное качество мягкого крыла дает объективную оценку правильности принятых проектных решений, позволяет точно настроить угол установки крыла на стропной поддержке. Данные об аэродинамическом качестве крыльев для моторных

парапланов и паралетов позволяют уточнить потребную тягу двигателя в различных аэродинамических конфигурациях.

Кроме того, имея данные об аэродинамическом качестве серийно выпускаемых крыльев, можно дать сравнительную оценку технического совершенства представленных образцов.

Но получение точных экспериментальных данных об аэродинамическом качестве мягкого крыла на стропной поддержке сопровождается дополнительными трудностями, связанными с его особенностями. Так, используемый обычно в авиации способ одновременного измерения воздушной скорости и скорости изменения барометрической высоты в данном случае практически бесполезен, поскольку скорость снижения столь мала, что находится на границе чувствительности барометра, а малость воздушной скорости увеличивает относительный масштаб погрешности ее измерения. При этом любые возмущения окружающего воздуха сравнимы по величине со скоростью снижения (находящейся в пределах 0,8–1,2 м/с) и по порядку – с воздушной скоростью установившегося полета (10–18 м/с). Проблема обостряется тем, что полеты вынужденно проводятся на малой высоте, в зоне активной приземной турбулентности, не прекращающейся полностью даже в утренней инверсии на равнине. Особенность этой турбулентности проявляется в несинхронности колебаний горизонтальной и вертикальной составляющих скорости в порывах ветра.

Попытки компенсировать возмущения маршрутом из одинаковых отрезков прямого и обратного пути наталкиваются на ограничение в возможной длительности стабильного невозмущенного ветром и управлением полета (параплан – система с маятниковой устойчивостью, склонная к затухающим колебаниям длительностью до четверти минуты после каждого маневра), а также на непостоянство воздушных потоков за время медленного пролета мерной дистанции туда и обратно. Та же проблема, но в еще большей степени, проявляется при попытке определить компоненты скорости по показаниям спутниковой системы навигации, поскольку в последнем случае влияние ветра вообще не учитывается.

При этом для надлежащей информативности точность измерения должна быть высокой – аэrodинамическое качество современных парапланов может достигать 8 единиц [1, 2] и в пределах одного класса имеет характерную разбежку порядка $\pm 0,5$, т.е. прибор должен достоверно определить разницу в $0,2^\circ$ угла планирования, не превышающего 7° .

Однако вышеописанные проблемы не исчerpываются, поскольку летательный аппарат с мягким крылом на стропной поддержке фактически представляет собой комплект снаряжения из крыла, а также подвески весьма различной формы и с различной деформацией настроичными ремнями, причем в этой подвеске размещается омываемый потоком пилот различной комплекции и в различной позе. Наиболее удачный вариант сочетания подвески, пилота и его позы, по сравнению с наименее удачным, дает разницу в аэродинамическом качестве, превышающую 1,5 единиц [3, 4]. Это совершенно нивелирует разницу между самими крыльями одного класса, т.е. для получения достоверных результатов тестовые полеты должен проводить один и тот же пилот в одной и той же подвеске с одними и теми же настройками, и в одной и той же позе. И для получения сравнительной базы парапланов различных производителей и серий делать это он должен несколько лет. Фактически это обеспечить нереально.

Из опробованных методов измерения аэродинамического качества параплана наиболее точным показало себя непосредственное измерение угла планирования (угла наклона траектории). Современные AHRS (Attitude Heading Reference System, системы определения углового положения и курса), использующие алгоритмы фильтрации Калмана или Мажвика, имеют погрешность определения углового положения менее $\pm 0,1^\circ$ [5, 6]. Точность измерения углов с помощью специализированных инклинометров достигает $\pm 0,05^\circ$ [7].

Для непосредственного измерения угла планирования используются датчики угла набегания потока к горизонту, помещенные в оперенные корпуса с узлами шарнирной подвески в центре тяжести. Вариант такого датчика, подвешиваемого снизу к подвеске на коротком фале, опробовал Сергей Ларионов [8]. Такой тип подвеса приводит к дополнительной погрешности измерения – параплан склонен колебаться вокруг центра тяжести системы, находящегося несколько выше карабинов подвески. В результате при колебаниях на скорость поступательного движения накладывается линейная скорость вращения параплана, на которую в свою очередь накладывается линейная скорость колебания датчика на фале, причем стабилизация датчика на набегающий поток происходит с запаздыванием. По данным работы [8], без фильтрации измеренный угол тангажа колебается в пределах 2° при полете в спокойном воздухе. Кроме того, после окончания любых маневров крыло качается еще как

минимум 10–15 с, с периодом колебаний около 7 с. Качания вызывают также перемещения в подвеске. С использованием выборки установившихся режимов и осреднения данных на выбранных участках становится различима разница между режимами в $\pm 0,5^\circ$.

Несколько более точные показания угла наклона траектории удалось снять Квентину Обурю (Quentin Aubourg) с помощью датчика «Vector probe» [9, 10]. Особенностью его решения является установка датчика угла наклона траектории между стропами первого ряда первой шеренги, между крылом и подвеской. Это позволило устранить колебания датчика на фале, а также уменьшило степень влияния колебаний параплана на проводимые измерения. Полностью устранить это влияние, совместив ось вращения датчика с осью колебательных движений параплана, практически невозможно, поскольку у разных парапланов она на разной высоте и, кроме того, находится в зоне возмущенного потока над подвеской. Опубликованные Quentin Aubourg данные свидетельствуют о достигнутой точности измерения угла наклона траектории $\pm 0,2^\circ$.

Общей проблемой для обеспечения точности измерений обоими описанными методами является необходимость калибровки датчиков строго горизонтальным воздушным потоком, в противном случае погрешность углов установки оперения и датчика приводит к систематическим ошибкам. Кроме того, при измерениях описанными методами показания датчика искажаются из-за влияния со-противления пилота и подвески.

Метод измерения аэродинамического качества мягкого крыла на стропном подвесе по наклону свободных концов

Попробуем исключить из исследуемой системы подвеску и пилота, а также аэродинамический обвес датчика углового положения. Для этого мы можем выставить крыло на свободных концах в устойчивом приземном потоке (например на пологом морском берегу во время дневного бриза, или в аэродинамической трубе, или пробежкой по ВПП) и прикрепить датчик углового положения к дополнительному звену между карабином наземного снаряжения и свободными концами крыла, например так, как показано на рис. 1.

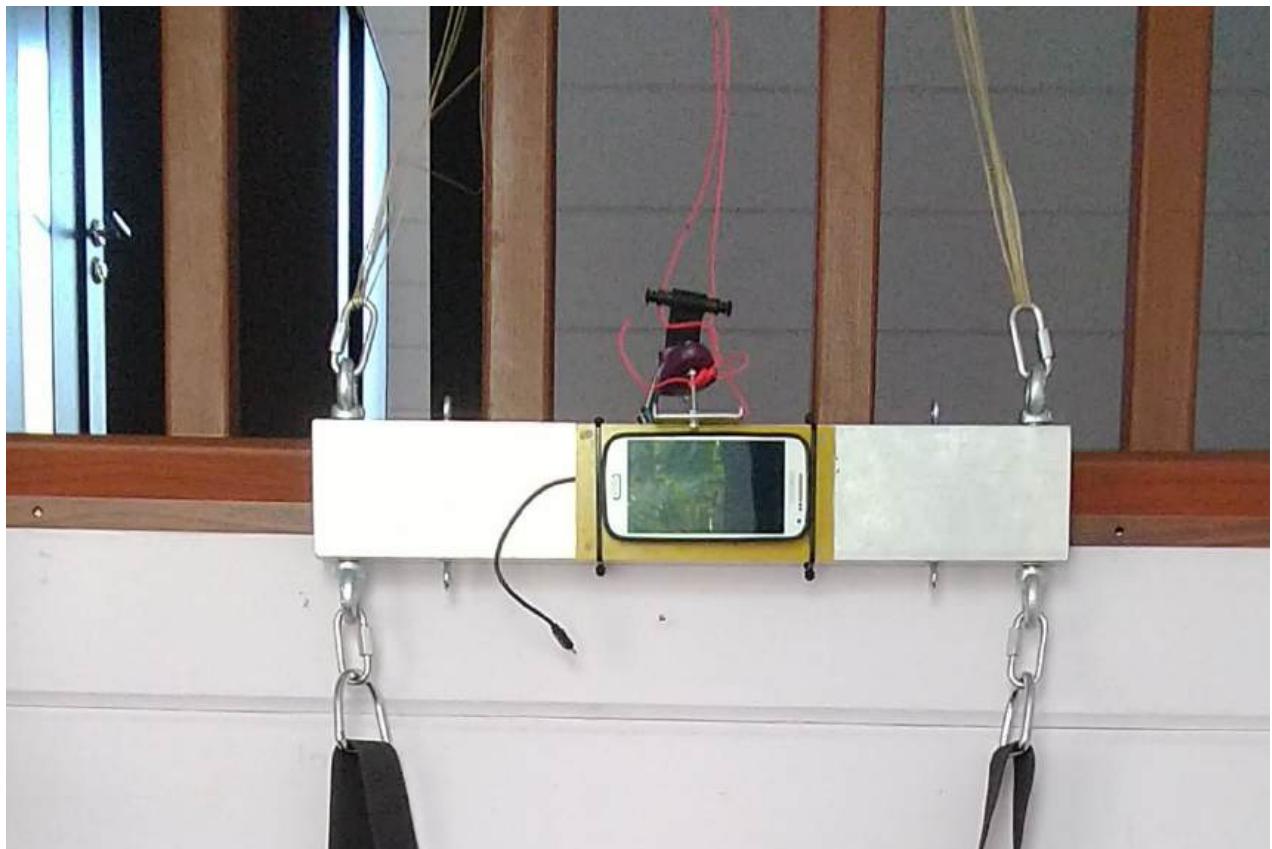


Рис. 1. Вариант конструкции дополнительного звена для измерения угла наклона равнодействующей аэродинамических сил

При этом для калибровки датчика достаточно вывесить звено вертикально, подвесив к нему груз, и измерить угол к вертикалі после прекращения колебаний системы, после чего учесть его в расчетах.

Звено конструктивно может представлять собой перемычку между точками крепления свободных концов, как это показано на рис. 1, или встраиваться раздельно между карабинами подвески и свободными концами каждой из сторон крыла. В последнем случае понадобится два датчика углов, по одному на каждую точку крепления свободных концов – поскольку при измерениях двумя звенями датчики окажутся дополнительно наклонены по крену и рысканию, но симметрично в разные стороны, то, сложив их показания, дополнительные погрешности можно убрать [11–15].

Измерение аэродинамического качества параплана путем измерения наклона его свободных концов в режиме пробежки до отрыва от земли

Пусть воздушный поток движется горизонтально (рис. 2).

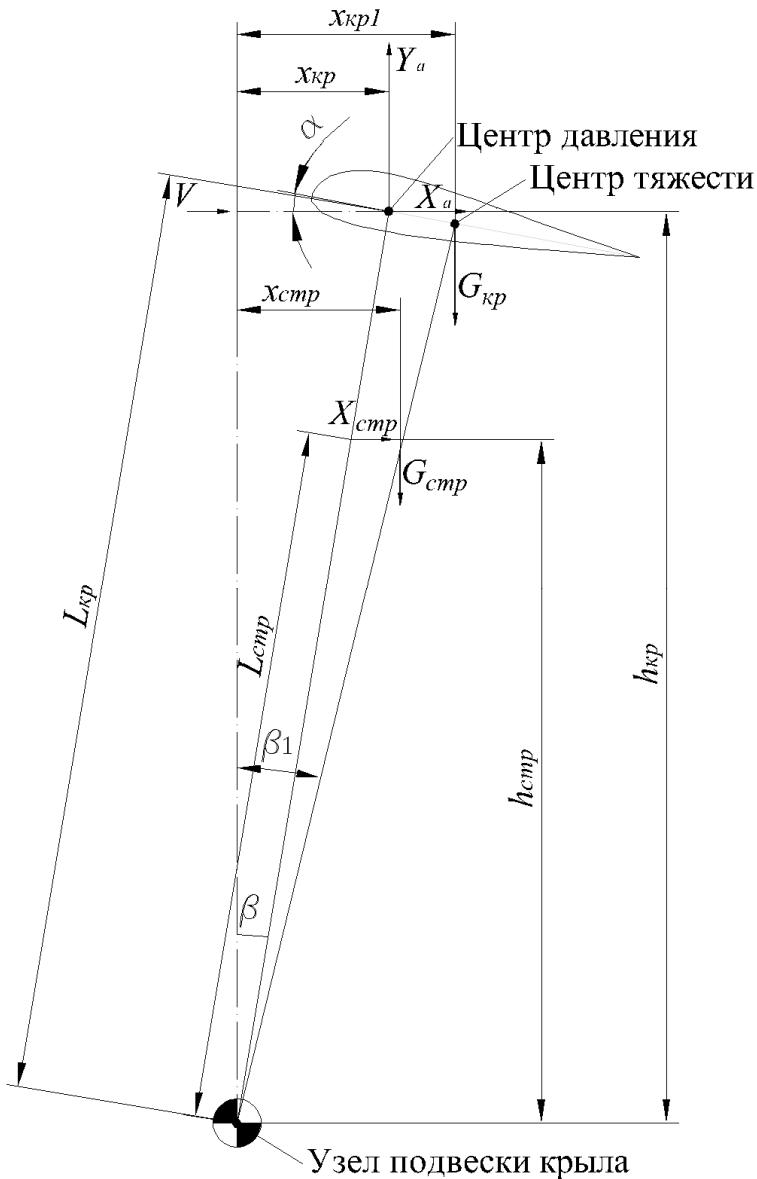


Рис. 2. Моменты сил, действующих на крыло, выставленное в горизонтальном потоке

Общим условием возможности такого положения является

$$Y_a > G_{kp} + G_{cpr}.$$

Система будет находиться в равновесии при равенстве моментов всех действующих сил:

$$Y_a x_{kp} = X_{kp} h_{kp} + G_{kp} x_{kp1} + X_{ctrp} h_{ctrp} + G_{ctrp} x_{ctrp},$$

здесь Y_a и X_a – компоненты полной аэродинамической силы в скоростной системе координат; X_{ctrp} – сила сопротивления строп (вертикальной проекцией этой силы пренебрегаем в связи с ее малостью); G_{kp} и G_{ctrp} – веса крыла и строп соответственно; x_{kp} , x_{kp1} , x_{ctrp} , h_{kp} , h_{ctrp} – плечи действия вертикальных и горизонтальных сил соответственно. Центр давления и центр тяжести крыла в общем случае не совпадают, центр давления находится в районе четверти средней аэродинамической хорды (далее – САХ) крыла, а центр тяжести смешен несколько ближе к середине САХ, по данным 3D-моделирования и вывешивания крыльев на свободных концах. Таким образом, разбежка центров приложения этих сил не превышает четверти САХ. Поскольку вес крыла и строп не принимает участия в натяжении свободных концов, а лишь способствует отклонению линии действия натягивающей стропы силы от вертикали, измерительное звено в узле подвески крыла выставится на угол β .

Длины от узла подвески до действующих сил вдоль стропления L_{kp} и L_{ctrp} принимаем постоянными, тогда плечи действия аэродинамических сил можно выразить через угол наклона равнодействующей к вертикали β , а плечо действия веса крыла через угол β_1 [10]:

$$Y_a L_{kp} \sin \beta = X_{kp} L_{kp} \cos \beta + X_{ctrp} L_{ctrp} \cos \beta + G_{kp} L_{kp} \sin \beta_1 + G_{ctrp} L_{ctrp} \sin \beta_1.$$

Следует заметить, что на самом деле расстояние от узла подвески до равнодействующей сопротивления арочного крыла находится несколько ниже его центральной хорды и близко к координате центра тяжести фигуры, образованной хордами крыла вдоль всего его размаха.

Разделив обе части уравнения на $L_{kp} \sin \beta$, получим

$$Y_a = \left(X_{kp} + \frac{L_{ctrp}}{L_{kp}} X_{ctrp} \right) \operatorname{ctg} \beta + \left(G_{kp} + \frac{L_{ctrp}}{L_{kp}} G_{ctrp} \right) \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta}.$$

По определению аэродинамического качества крыла со стропной системой:

$$K_{nn} = \frac{Y_a}{X_{kp} + X_{ctrp}}. \quad (1)$$

Тогда можно записать:

$$K_{nn} = \frac{\left(X_{kp} + \frac{L_{ctrp}}{L_{kp}} X_{ctrp} \right) \operatorname{ctg} \beta + \left(G_{kp} + \frac{L_{ctrp}}{L_{kp}} G_{ctrp} \right) \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta}}{X_{kp} + X_{ctrp}},$$

сгруппировав K_{kp} в левой части уравнения:

$$K_{nn} = \frac{\left(1 + \frac{L_{ctrp}}{L_{kp}} \frac{X_{ctrp}}{X_{kp}} \right) \operatorname{ctg} \beta}{1 + \frac{X_{ctrp}}{X_{kp}}} + \frac{\left(G_{kp} + \frac{L_{ctrp}}{L_{kp}} G_{ctrp} \right) \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta}}{X_{kp} + X_{ctrp}} \quad (2)$$

и выразив с учетом формулы (1) знаменатель правого члена уравнения (2):

$$K_{nn} = \frac{\left(1 + \frac{L_{ctrp}}{L_{kp}} \frac{X_{ctrp}}{X_{kp}} \right) \operatorname{ctg} \beta}{1 + \frac{X_{ctrp}}{X_{kp}}} + K_{nn} \frac{\left(G_{kp} + \frac{L_{ctrp}}{L_{kp}} G_{ctrp} \right) \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta}}{Y_a}.$$

Приведем полученное выражение к $K_{\text{пп}}$:

$$K_{\text{пп}} = \frac{\left(1 + \frac{L_{\text{стр}}}{L_{\text{kp}}} \frac{X_{\text{стр}}}{X_{\text{kp}}} \right) \operatorname{ctg}\beta}{\frac{1 + \frac{X_{\text{стр}}}{X_{\text{kp}}}}{1 - \frac{\left(G_{\text{kp}} + \frac{L_{\text{стр}}}{L_{\text{kp}}} G_{\text{стр}} \right) \sin\beta_1}{Y_a} \sin\beta}}. \quad (3)$$

Коэффициент при $\operatorname{ctg}\beta$ в числителе полученной дроби не зависит от скорости набегающего потока. Из практики обычные соотношения для парапланерных крыльев:

$$\frac{X_{\text{стр}}}{X_{\text{kp}}} \leq 0,2; \quad \frac{L_{\text{стр}}}{L_{\text{kp}}} \cong 0,7; \quad \frac{\sin\beta_1}{\sin\beta} \cong 1,7.$$

С учетом приведенных значений коэффициент в числителе дроби (3) можно принять 0,95. Вес строп со свободными концами близок к весу крыла. Соответственно, можно записать

$$K_{\text{пп}} \cong \frac{0,95}{1 - 1,45 \frac{G_{\text{пп}}}{Y_a}} \operatorname{ctg}\beta. \quad (4)$$

Типичная рекомендованная взлетная подъемная сила парапланерного крыла с ножным стартом в 10–20 раз превышает его вес $G_{\text{пп}} = G_{\text{kp}} + G_{\text{стр}}$ в зависимости от размера. Соответственно, для режима пробежки до отрыва (практически реализуемом установкой крыла на трайк) мы получим

$$K_{\text{пп}} \cong 1,11 \div 1,02 \operatorname{ctg}\beta.$$

В этом выражении больший коэффициент при $\operatorname{ctg}\beta$ соответствует меньшей подъемной силе. Конкретное его значение уточняется по данным взвешивания крыла и трайка.

Тот же результат можно получить, выставив параплан на ровный ветер над ровной поверхностью, например на льду замерзнувшего озера, и измерив одновременно угол β и подъемную силу параплана либо динамометром, либо с помощью весов. Взвесив параплан, мы получим $\frac{G_{\text{пп}}}{Y_a}$, и подставив полученные данные в формулу (4), сможем определить $K_{\text{пп}}$.

Таким способом (с усреднением показаний для устранения влияния раскачивания крыла) мы можем получить точность коэффициента до второго знака после запятой. При этом погрешность измерения угла $\pm 0,5^\circ$ при измерении аэродинамического качества в 8 единиц приведет к погрешности качества $\pm 0,55$; погрешность определения угла $\pm 0,2^\circ$ приведет к ошибке измерения качества $\pm 0,23$. Использование специализированных инклинометров с точностью показаний $\pm 0,05^\circ$ может повысить точность измерения качества до $\pm 0,06$ [16–21].

Определение вклада в сопротивление подвески и пилота

Полученные на земле данные (β и $K_{\text{пп}}$) можно использовать в дальнейшем для определения вклада в общее сопротивление системы подвески и пилота (или трайка). Для этого рассмотрим схему сил, действующих на параплан в режиме планирования (рис. 3).

Во время полета мы можем измерить угол между соединительным звеном и вертикалью γ . Данный угол мал, но не равен нулю из-за влияния сопротивления груза и строп. Учитывая предварительно экспериментально полученный угол β , измерив угол γ , мы можем определить угол планирования θ , определяющий аэродинамическое качество системы крыло-груз:

$$K = \operatorname{ctg}\theta = \operatorname{ctg}(\beta + \gamma).$$

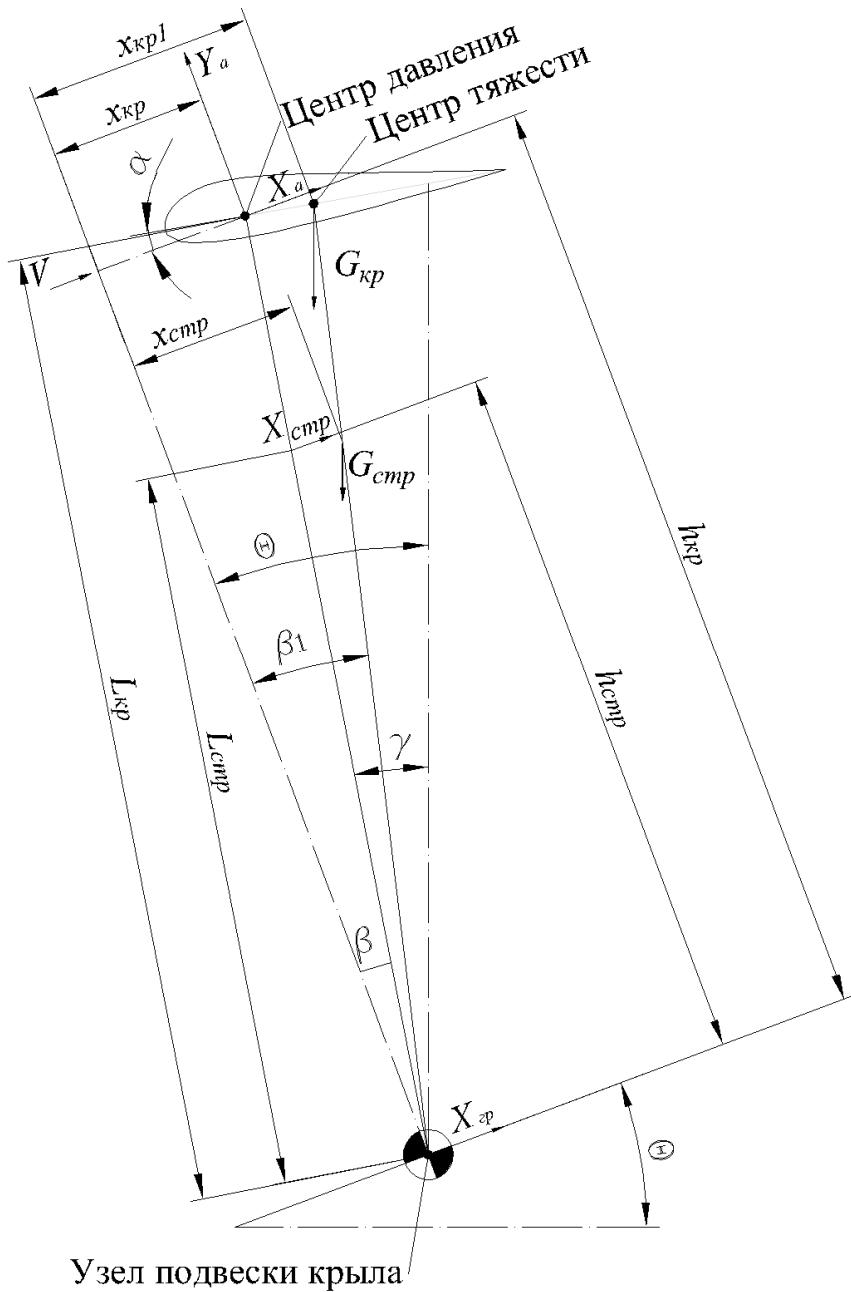


Рис. 3. Схема действия сил и моментов на параплан в планирующем полете

В установившемся планировании проекция суммарного веса системы на направление скорости уравновешивает все силы сопротивления, и мы можем записать

$$G_{\Sigma} \sin \theta = X_{kp} + X_{csp} + X_{rp}; \quad (3)$$

$$Y_a = G_{\Sigma} \cos \theta.$$

Но тогда согласно определению (1):

$$K_{nn} = \frac{G_{\Sigma} \cos \theta}{X_{kp} + X_{csp}}. \quad (5)$$

И, соответственно, удельное сопротивление крыла:

$$\frac{X_{kp} + X_{csp}}{G_{\Sigma}} = \frac{\cos(\beta + \gamma)}{K_{nn}}.$$

Подставив выражение (4) в (3), получим

$$G_{\Sigma} \sin \theta = \frac{G_{\Sigma} \cos \theta}{K_{\text{пп}}} + X_{\text{рп}},$$

из которого удельное сопротивление груза (подвески, платформы, целевой нагрузки):

$$\frac{X_{\text{рп}}}{G_{\Sigma}} = \sin(\beta + \gamma) - \frac{\cos(\beta + \gamma)}{K_{\text{пп}}}.$$

Источники дополнительных погрешностей измерения

Следует заметить, что полетное аэродинамическое качество отличается от стендового (берег моря, морской бриз, пробежки по взлетной полосе) и трубного вследствие различной турбулентности местного течения, как по интенсивности, так и масштабу.

Дополнительная энергетика в турбулентном воздухе приземного или трубного потока уменьшает затраты энергии на турбулизацию пограничного слоя и затягивает срывные режимы на большие углы атаки. Более того, турбулентность с масштабом более хорды крыла приводит к пульсации угла атаки, близкому к таковой при маховых движениях крыла [22].

Уменьшить погрешность измерения вследствие влияния турбулентности потока можно выбором места измерений с протяженной ровной поверхностью, например на льду обширного замерзшего озера, или проведения сравнительных измерений в одном и том же месте при одной и той же балльности ветра. Идеальных условий достигнуть невозможно, но, с другой стороны, и реальные полеты параплана, особенно парение, проходят в турбулентной атмосфере.

На точность полученных результатов также влияют сморщенность и складки на необлетанном и долго хранившемся крыле, искажения аэродинамического профиля мокрого крыла, грязь, песок на крыле, вытянутые стропы и потертысть ткани крыла.

Заключение

Таким образом, показано, что существует возможность измерять аэродинамическое качество мягких крыльев на стропной поддержке с достаточной точностью, с применением измерительных устройств-углеромеров на соединительном звене-карабине, присоединенном к свободным концам. При этом имеется возможность определять относительный вклад в общее сопротивление как крыла, так и подвески с пилотом (или любого другого груза). Кроме того, установка датчиков углового положения на соединительных звеньях может оказаться полезной для беспилотных и опционально управляемых систем с мягким крылом, поскольку позволяет контролировать крыло в процессе выведения и резких эволюций, а также осуществлять активную стабилизацию полета [23–29].

Список литературы

1. Коршаковский С. И., Красненков М. А., Марков А. А., Субботин В. Ю. Измерение воздушной скорости летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2007. Т. 14, № 3. С. 10–16.
2. Чжо З. Л., Моунг Х. О. Разработка метода оценивания скорости ветра в полете с использованием воздушной скорости самолета // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25, № 2. С. 152–159.
3. Максимов А. К. Метод косвенного измерения аэродинамических углов летательного аппарата с использованием акселерометров и датчиков давления // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 10. С. 893–899.
4. Максимов А. К. Оценка погрешностей косвенного измерения аэродинамических углов летательного аппарата с использованием акселерометров и датчиков давления // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 634–639.
5. Солдаткин В. М., Солдаткин В. В., Никитин А. В., Соколова Г. П. Обеспечение динамической точности системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 9. С. 535–543.
6. Корсун О. Н., Николаев С. В. Алгоритм идентификации систематических погрешностей измерений воздушной скорости и аэродинамических углов по данным летного эксперимента // Идентификация систем и задачи управления : тр. X Междунар. науч.-практ. конф. 2015. С. 1016–1032.
7. Корсун О. Н., Николаев С. В., Поплавский Б. К. Идентификация аэродинамических коэффициентов современного маневренного самолета в эксплуатационном диапазоне углов атаки // Материалы XXVII науч.-техн. конф. по аэродинамике. М., 2016. С. 142–143.

8. Деревянкин В. П., Павловский А. А., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М. Влияние технологического разброса на аэродинамические характеристики и погрешности многофункционального приемника воздушных давлений аэродинамических систем самолета // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 1. С. 163–168.
9. Адамов А. П., Адамова А. А., Семенцов С. Г. Современные материалы в конструкции датчиков для аэрокосмических аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 84–90.
10. Jann T., Greiner-Perth C. A New Type of Airflow Sensor for Gliding Parachutes // 24th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference. Denver, USA, 2017. Jun 2.
11. Hummel J., Göhlich D., Schmehl R. Automatic Measurement and Characterization of the Dynamic Properties of Tethered Membrane Wings // Wind Energ. Sci. Discuss. 2018. № 1. P. 20–23.
12. Oehler J., Schmehl R. Aerodynamic Characterization of a Soft Kite by in Situ Flow Measurement // Wind Energy Science. 2019. № 1. P. 1–21.
13. Hummel J., Göhlich D., Schmehl R. Automatic Measurement and Characterization of the Dynamic Properties of Tethered Membrane Wings // Wind Energy Science. 2019. № 1. P. 41–55.
14. Johari H., Yakimenko O., Jann T. Aerodynamic Characterization of Parafoils // Precision Aerial Delivery Systems: Modeling, Dynamics, and Control. 2015. № 1. P. 199–261.
15. Luo Sh., Tan P., Sun Q. [et al.]. In-flight wind identification and soft landing control for autonomous unmanned powered parafoils // International Journal of Systems Science. 2018. Vol. 49, iss. 5. P. 929–946. doi: 10.1080/00207721.2018.1433245
16. Zhukov K. A., Vyshinsky V. V., Rohacs J. Effects of Atmospheric Turbulence on UAV // Proceedings of the IFFK 2014. Budapest, Hungary, 2014.
17. Maślanka P., Korycki R. Sensitivity of Aerodynamic Characteristics of Paraglider Wing to Properties of Covering Material // AUTEX Research Journal. 2022. Vol. 22, № 1. P. 64–72. doi: 10.2478/aut-2020-0010
18. Bocquet F., Balsley B. B., Tjernström M., Svensson G. Comparing Estimates of Turbulence Based on Near-Surface Measurements in the Nocturnal Stable Boundary Layer // Boundary-Layer Meteorology. 2010. № 1. P. 43–60.
19. Breukels J. An Engineering Methodology for Kite Design // PhD thesis. Delft University of Technology. 2011. URL: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:cdece38a-1f13-47cc-b277-ed64fdda7cdf>
20. URL: <https://comparaglider.com/>
21. URL: https://www.reddit.com/r/freeflight/comments/oduloi/wing.glide_ratios/
22. URL: <https://xcmag.com/magazine-articles/go-further-how-much-does-a-pod-harness-help/>
23. URL: <https://www.simscale.com/forum/t/paraglider-harness-type-comparison/82615/6>
24. URL: <https://x-io.co.uk/open-source-imu-and-ahrs-algorithms/>
25. URL: <https://doi.org/10.3390/s22228996>
26. URL: <https://www.wit-motion.com/proztgid/39.html>
27. URL: <https://zidar.ru/2019/01/28/flyonline-probe/>
28. URL: <https://vector-probe.com/>
29. URL: <https://youtu.be/GkCIBhXeLnA>

References

1. Korshakovskiy S.I., Krasnenkov M.A., Markov A.A., Subbotin V.Yu. Measuring the airspeed of an aircraft. *Vestnik Moskovskogo aviationskogo instituta = Bulletin of the Moscow Aviation Institute*. 2007;14(3):10–16. (In Russ.)
2. Chzho Z.L., Moun Kh.O. Development of a method for estimating wind speed in flight using aircraft airspeed. *Vestnik Moskovskogo aviationskogo instituta = Bulletin of the Moscow Aviation Institute*. 2018;25(2):152–159. (In Russ.)
3. Maksimov A.K. Method of indirect measurement of aerodynamic angles of an aircraft using accelerometers and pressure sensors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Prirodstroyeniye = Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2019;62(10):893–899. (In Russ.)
4. Maksimov A.K. Estimation of errors in indirect measurement of aerodynamic angles of an aircraft using accelerometers and pressure sensors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Prirodstroyeniye = Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2020;63(7):634–639. (In Russ.)
5. Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Nikitin A.V., Sokolova G.P. Ensuring the dynamic accuracy of the aircraft's air signal system with a fixed, non-protruding flow receiver. *Mekhanika, avtomatizatsiya, upravleniye = Mechatronics, automation, control*. 2020;21(9):535–543. (In Russ.)
6. Korsun O.N., Nikolayev S.V. An algorithm for identifying systematic errors in airspeed measurements and aerodynamic angles based on flight experiment data. *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya: tr. X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Identification of systems and control tasks : proceedings of the X International scientific and practical conference*. 2015:1016–1032. (In Russ.)
7. Korsun O.N., Nikolayev S.V., Poplavskiy B.K. Identification of aerodynamic coefficients of a modern maneuverable aircraft in the operational range of angles of attack. *Materialy XXVII nauch.-tekhn. konf. po aerodinamike = Materials of the XXVII Scientific and Technical Conference on Aerodynamics*. Moscow, 2016: 142–143. (In Russ.)

8. Derevyankin V.P., Pavlovskiy A.A., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. The influence of technological variation on the aerodynamic characteristics and errors of a multifunctional air pressure receiver of aircraft aerodynamic systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviationskaya tekhnika = Proceedings of higher educational institutions. Aviation equipment.* 2022;(1):163–168. (In Russ.)
9. Adamov A.P., Adamova A.A., Sementsov S.G. Modern materials in the design of sensors for aerospace vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(1):84–90. (In Russ.)
10. Jann T., Greiner-Perth C. A New Type of Airflow Sensor for Gliding Parachutes. *24th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference.* Denver, USA, 2017; Jun 2.
11. Hummel J., Göhlich D., Schmehl R. Automatic Measurement and Characterization of the Dynamic Properties of Tethered Membrane Wings. *Wind Energ. Sci. Discuss.* 2018;(1):20–23.
12. Oehler J., Schmehl R. Aerodynamic Characterization of a Soft Kite by in Situ Flow Measurement. *Wind Energy Science.* 2019;(1):1–21.
13. Hummel J., Göhlich D., Schmehl R. Automatic Measurement and Characterization of the Dynamic Properties of Tethered Membrane Wings. *Wind Energy Science.* 2019;(1):41–55.
14. Johari H., Yakimenko O., Jann T. Aerodynamic Characterization of Parafoils. *Precision Aerial Delivery Systems: Modeling, Dynamics, and Control.* 2015;(1):199–261.
15. Luo Sh., Tan P., Sun Q. et al. In-flight wind identification and soft landing control for autonomous unmanned powered parafoils. *International Journal of Systems Science.* 2018;49(5):929–946. doi: 10.1080/00207721.2018.1433245
16. Zhukov K.A., Vyshinsky V.V., Rohacs J. Effects of Atmospheric Turbulence on UAV. *Proceedings of the IFFK 2014.* Budapest, Hungary, 2014.
17. Maślanka P., Korycki R. Sensitivity of Aerodynamic Characteristics of Paraglider Wing to Properties of Covering Material. *AUTEX Research Journal.* 2022;22(1):64–72. doi: 10.2478/aut-2020-0010
18. Bocquet F., Balsley B. B., Tjernström M., Svensson G. Comparing Estimates of Turbulence Based on Near-Surface Measurements in the Nocturnal Stable Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorology.* 2010;(1):43–60.
19. Breukels J. An Engineering Methodology for Kite Design. *PhD thesis. Delft University of Technology.* 2011. Available at: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:cdece38a-1f13-47cc-b277-ed64fdda7cdf>
20. Available at: <https://comparaglider.com/>
21. Available at: https://www.reddit.com/r/freeflight/comments/oduloi/wing.glide_ratios/
22. Available at: <https://xcmag.com/magazine-articles/go-further-how-much-does-a-pod-harness-help/>
23. Available at: <https://www.simscale.com/forum/t/paraglider-harness-type-comparison/82615/6>
24. Available at: <https://x-io.co.uk/open-source-imu-and-ahrs-algorithms/>
25. Available at: <https://doi.org/10.3390/s22228996>
26. Available at: <https://www.wit-motion.com/proztgjd/39.html>
27. Available at: <https://zidar.ru/2019/01/28/flyonline-probe/>
28. Available at: <https://vector-probe.com/>
29. Available at: <https://youtu.be/GkCIBhXeLnA>

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Витальевич Швед

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры проектирования и
сертификации авиационной техники,
Московский авиационный институт
(Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: yuriy-shved@mail.ru

Yuri V. Shved

Candidate of technical sciences, senior lecturer
of the sub-department of design and certification
of aviation equipment,
Moscow Aviation Institute
(4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.07.2025

Поступила после рецензирования/Revised 10.08.2025

Принята к публикации/Accepted 02.09.2025

ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ DATA SCIENCE И МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

И. Е. Старостин

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

Аннотация. Актуальность и цели. Построение математических моделей систем различной физической и химической природы является важнейшим этапом разработки методик проектирования и эксплуатации упомянутых систем. В настоящее время существуют методы Data Science, посвященные сбору и обработке данных с последующим построением математических моделей. Для построения упомянутых моделей необходимо задать их класс. Основными требованиями к математическим моделям систем различной физической и химической природы являются их точность и адекватность (не противоречивость физическим и химическим законам). Для построения класса удовлетворяющих упомянутым требованиям математических моделей систем был предложен в рамках механики, электродинамики и современной неравновесной термодинамики метод математического прототипирования энергетических процессов. В соответствии с упомянутым методом могут быть получены в виде системы дифференциальных уравнений полные математические модели различных физических и химических систем с точностью до экспериментально исследуемых постоянных коэффициентов. Затем полученные полные модели преобразовываются в упрощенные аналитические модели с точностью до постоянных коэффициентов, которые обучаются на экспериментальных данных. Методике построения моделей, применимых для решения практических задач, на базе методов Data Science и метода математического прототипирования энергетических процессов посвящена настоящая работа. *Материалы и методы.* Синтез в виде дифференциальных уравнений полной модели динамики физических и химических процессов осуществляется на базе метода математического прототипирования энергетических процессов и методов динамического программирования. Построение упрощенных аналитических моделей, применимых для решения практических задач, осуществляется путем вычислительного эксперимента на базе полной модели с дальнейшим применением методов идентификации, символьной регрессии, машинного обучения. *Результаты.* Предложенная методика позволяет строить точные и адекватные модели, применимые для решения практических задач в приемлемые сроки. *Выводы.* Предложенная методика построения математических моделей может быть положена в основу программино-технологической платформы цифровых двойников, потребляющей приемлемые вычислительные ресурсы.

Ключевые слова: метод математического прототипирования энергетических процессов, Data Science, машинное обучение, динамическое программирование

Для цитирования: Старостин И. Е. Построение аналитических моделей различных физико-химических систем методами Data Science и математического прототипирования энергетических процессов // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 36–44. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-4

CONSTRUCTION OF ANALYTICAL MODELS OF VARIOUS PHYSICAL AND CHEMICAL SYSTEMS BY METHODS OF DATA SCIENCE AND MATHEMATICAL PROTOTYPING OF ENERGY PROCESSES

I.E. Starostin

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

Abstract. *Background.* Construction of mathematical models of systems of various physical and chemical nature is the most important stage in the development of methods for designing and operating the above-mentioned systems. Currently, there are Data Science methods dedicated to collecting and processing data with subsequent construction of

mathematical models. To construct the above-mentioned models, it is necessary to specify their class. The main requirements for mathematical models of systems of various physical and chemical nature are their accuracy and adequacy (consistency with physical and chemical laws). To construct a class of mathematical models of the above-mentioned systems that satisfy the above-mentioned requirements, a method of mathematical prototyping of energy processes was proposed within the framework of mechanics, electrodynamics and modern non-equilibrium thermodynamics. In accordance with the above-mentioned method, complete mathematical models of various physical and chemical systems with an accuracy of up to experimentally studied constant coefficients can be obtained in the form of a system of differential equations. Then, the obtained complete models are transformed into simplified analytical models with an accuracy of up to constant coefficients, which are trained on experimental data. This work is devoted to the methodology of constructing models applicable for solving practical problems based on Data Science methods and the method of mathematical prototyping of energy processes. *Matherials and methods.* Synthesis in the form of differential equations of a complete model of the dynamics of physical and chemical processes is carried out on the basis of the method of mathematical prototyping of energy processes and methods of dynamic programming. Construction of simplified analytical models applicable to solving practical problems is carried out by means of a computational experiment based on a complete model with further application of methods of identification, symbolic regression, machine learning. *Results.* The proposed methodology allows to build accurate and adequate models applicable for solving practical problems within acceptable timeframes. *Conclusions.* The proposed methodology for constructing mathematical models can be used as the basis for a software and technology platform for digital twins that consumes acceptable computing resources.

Keywords: method of mathematical prototyping of energy processes, Data Science, machine learning, dynamic programming

For citation: Starostin I.E. Construction of analytical models of various physical and chemical systems by methods of Data Science and mathematical prototyping of energy processes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):36–44. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-4

Введение

Построение математических моделей (ММ) систем различной физической и химической природы является важнейшим этапом проектирования и эксплуатации упомянутых систем [1–4]. В общем случае для построения ММ любых систем из экспериментальных данных (ЭД) могут быть использованы методы Data Science [5, 6], методы системного анализа [7]. В соответствии с упомянутыми методами осуществляются постановка цели исследования, сбор данных с последующей обработкой и исследованием, далее – построение ММ исследуемой системы с последующей практической реализацией построенной ММ [5–7]. Упомянутые ММ ищутся в заданных классах ММ [7, 8] методами, упомянутыми в работах [7–10]. Основными требованиями, предъявляемыми к ММ систем различной физической и химической природы, являются необходимая точность (не ниже заданной точности) и адекватность (не противоречивость законам физики) [7].

Для построения удовлетворяющих упомянутым требованиям классов ММ систем, характеризующихся протеканием в них физических и химических процессов (ФХП) различной природы, автором был предложен в рамках современной неравновесной термодинамики, механики и электродинамики метод математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП) [11–16]. Отсюда построенные ММПЭП в виде системы дифференциальных уравнений (ДУ) ММ динамики различных ФХП не противоречат общим физическим законам (законам сохранения, началам термодинамики, и т.д.), а также физическим особенностям протекания процессов в рассматриваемом объекте [11–16]. Для решения упомянутых практических задач (ПЗ) [1–4] полученные ММПЭП модели системы преобразовываются к упрощенным аналитическим ММ, применимым для решения упомянутых ПЗ, которые обучаются на соответствующих ЭД [13].

Цель настоящей работы – разработка единого подхода синтеза ММ систем различной физической и химической природы на основе ММПЭП и методов Data Sciense.

Материалы и методы

В рамках ММПЭП состояние системы в текущий момент времени однозначно (независимо от ее предыстории) характеризуется ее координатами состояния, изменяющимися в результате протекания ФХП внутри системы и внешних потоков в нее в рамках законов сохранения (рис. 1) [11, 12]. Причиной и необходимым условием протекания различных ФХП являются термодинамические силы, определяемые через потенциалы взаимодействия с учетом законов сохранения (рис. 1) [11, 12]. Независимо от термодинамических сил детали динамики ФХП определяются кинетическими свойствами системы (рис. 1), «шкалой» которых является кинетическая матрица [11, 12]. В результате протекания

ФХП (кроме процессов теплообмена) выделяются некомпенсированные теплоты, которые распределяются по температурам (в общем случае неравновесных) в системе в соответствии с долями распределения некомпенсированных теплот (рис. 1) [11, 12]. Приращения внутренних энергий в системе связано с приращением температур через приведенные теплоемкости [12], а с прочими координатами состояния – через приведенные тепловые эффекты (рис. 1) [12].

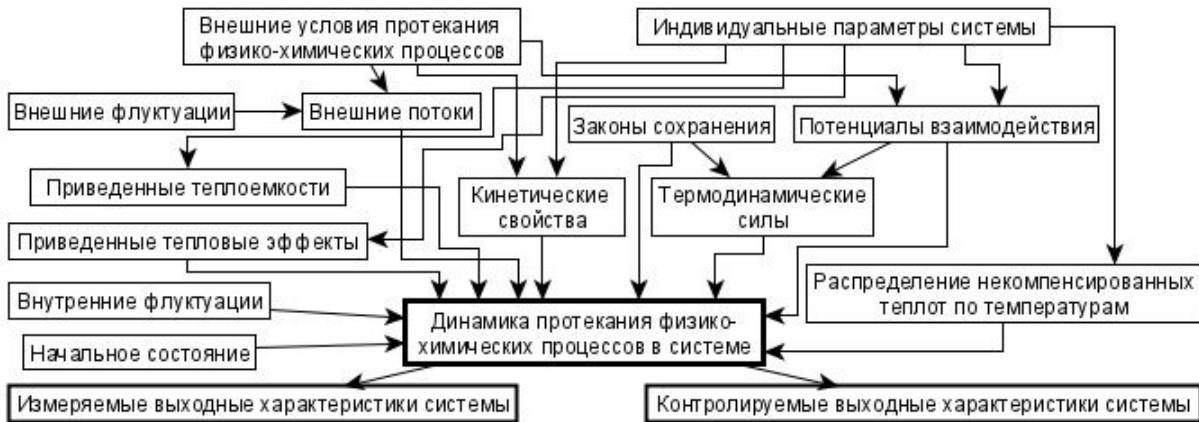


Рис. 1. Факторы, определяющие протекание процессов различной физической и химической природы

Динамика процессов в рассматриваемой системе определяет динамику ее измеряемых характеристик (ИХ) и контролируемых характеристик (КХ) (рис. 1) [11, 12]. Для реализации в численном виде ММ, полученных ММПЭП, необходимо с точностью до экспериментально исследуемых постоянных коэффициентов задать функции состояния (табл. 1) [12].

Таблица 1

Функции состояния для свойств веществ и процессов

Свойства вещества или процесса	Задание свойства вещества или процесса
Диссипативная матрица	Задается через [14]: – обратимые составляющие; – приведенные необратимые составляющие; – выбор фильтров положительности необратимых составляющих на основе разложения диссипативной матрицы на ее обратимые и необратимые составляющие с положительной фильтрацией необратимых составляющих
Доли распределения некомпенсированных теплот	Задается через [16]: – приведенные доли распределения некомпенсированной теплоты; – выбор фильтров положительности долей распределения некомпенсированной теплоты на основе нормализации отфильтрованных через положительные фильтра упомянутых приведенных долей распределения некомпенсированных теплот
Потенциалы взаимодействия Приведенные теплоемкости Приведенные тепловые эффекты	Задается в соответствие с первым и вторым началом термодинамики через [15]: – частные производные приведенной энтропии по координатам состояния; – задается через частные производные приведенных внутренних энергий по координатам состояния
Матрица баланса	Задается в соответствие с законами сохранения через независимые составляющие

Как видно из табл. 1, для задания приведенных в ней функций состояния необходимо задать функции состояния независимых составляющих (ФСНС) упомянутых функций наряду с функциями внешних потоков и флюктуаций, которые также можно отнести к ФСНС (табл. 2) [15]. На упомянутые ФСНС могут быть наложены ограничения, обусловленные физикой конкретной системы, однако общефизических ограничений не накладывается [15]. Благодаря этому ФСНС могут быть построены

из ЭД известными методами теории идентификации [8, 15], символьной регрессии [10, 15], машинного обучения [9, 15]. При этом ММ, полученные ММПЭП, не противоречащие законам физики, могут воспроизвести любой режим работы систем различной физической и химической природы [11, 12, 15]. ФСНС могут быть заданы, например, в виде аппроксимационных полиномов [17], а также прочих регрессионных моделей машинного обучения [9, 10].

Таблица 2

Задание независимых составляющих функций для характеристик систем

Независимые составляющие функций системы	Задание независимой составляющей функции системы
Обратимые составляющие диссипативной матрицы	Задается с точностью до экспериментально исследуемых параметров функция от координат состояния системы
Приведенные необратимые составляющие диссипативной матрицы	
Приведенные доли распределения некомпенсированной теплоты	
Приведенная энтропия	
Приведенные внутренние энергии	
Независимые составляющие матрицы баланса	
Внешние потоки	Задается с точностью до экспериментально исследуемых параметров функция в общем случае от времени и от координат состояния системы
Флуктуации	Задаются функции от случайных параметров

Из рис. 1 видно, что по экспериментальным данным измеряемых характеристик оцениваются параметры ФСНС, которые подразделяются на индивидуальные, меняющиеся от экземпляра к экземпляру системы, так и общие, одинаковые для всех экземпляров систем рассматриваемого класса, начальное состояние системы, затем по оцененным значениям упомянутых величин получаем динамику системы в требуемых ее режимах, а по ней – динамику ее ИХ и КХ [11, 12].

Однако для определения из ЭД входящих в ФСНС постоянных параметров необходимо достаточно большое число ЭД [11–16]. Это обуславливает проблему сбора ЭД [5, 18], а также проблему идентификации большого числа параметров ММ [8, 18], что приводит к необходимости локального упрощения полученной ММПЭП системы ДУ и ее численно-аналитического преобразования [13, 18]. Построение преобразованной аналитической ММ заключается в задании аналитического выражения общего решения системы ДУ полученных ММПЭП, коэффициенты которого ищутся из упомянутых ДУ (рис. 2) [13]. Полученное аналитическое общее решение ДУ наряду с функциями для ИХ и КХ системы является ее ММ, применимой для решения ПЗ (рис. 2) [13]. Приведенные на рис. 2 функции для параметров аналитической модели динамики рассматриваемой системы строятся одновременно с функциями для параметров ДУ системы полученных ММПЭП [13].



Рис. 2. Получение преобразованной аналитической модели системы

Для построения ФСНС из ЭД целесообразно применить регрессионные методы [16], в частности методы индуктивного порождения регрессионных моделей [10], позволяющие, разбив область определения искомых функций на подобласти, получить упрощенные функции в каждой такой области с последующим объединением упрощенных функций в полную функцию в искомой области определения [10]. В рассматриваемом случае, как видно из рис. 1, каждой совокупности таких подобластей соответствующих областей определения ФСНС соотносится совокупность участков кривых динамики ИХ и КХ системы (рис. 3) [18].

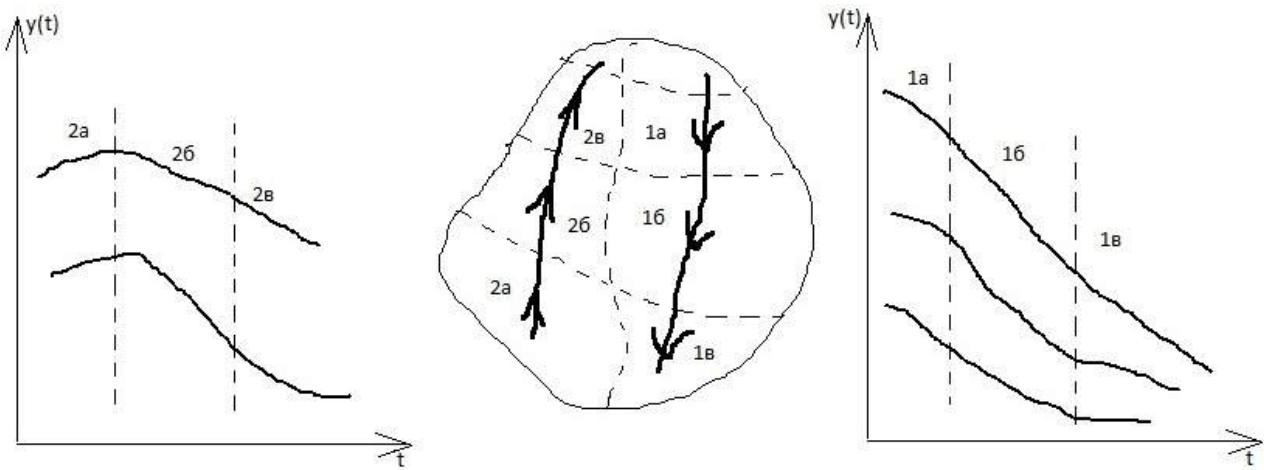


Рис. 3. Области упрощения функций состояния и соответствующие им динамики.
Буквенно-цифровые обозначения областей упрощения соответствуют буквенно-цифровым обозначениям соответствующих участков совокупностей кривых динамик измеряемых параметров

С помощью ФСНС и ММПЭП объясняются соответствующие участки динамик ИХ, а исходя из последовательного следования участков упрощения ФСНС друг за другом, мы восстановим упрощенные ФСНС на соответствующих областях упрощения (рис. 3) [18]. Далее в соответствие с методами индукционного порождения регрессионных моделей [10] мы строим ФСНС во всем фазовом пространстве [10, 18]. Аналогично строится и полное аналитическое выражение динамики состояния рассматриваемой системы [18] – аналитическое выражение общего решения системы ДУ, полученных ММПЭП. Такой подход существенно упрощает построение аналитических моделей, так как для аналогичных областей упрощения динамики строятся аналогично по полученным один раз соотношениям [7, 18].

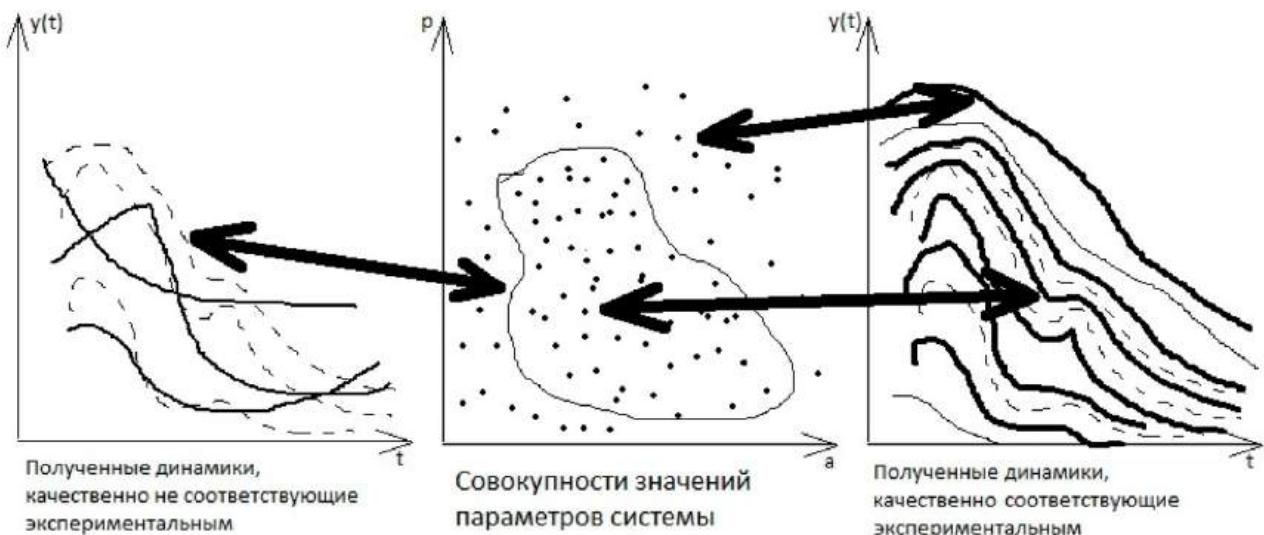


Рис. 4. Оценка областей значений параметров функций системы. Тонкой сплошной линией отделена область таких совокупностей параметров и соответствующих им рассчитанных по полной модели динамик, в которой рассчитанные динамики измеряемых параметров (на рисунке показаны толстыми сплошными линиями) соответствуют эксперименту. Пунктиром показаны экспериментальные динамики

В упомянутых областях упрощения ФСНС могут быть оценены области значений коэффициентов упрощенных ФСНС, а значит, и области значений коэффициентов ФСНС [18]. С этой целью целесообразно использовать методы Монте-Карло, в соответствии с которыми генерируются параметры ФСНС, рассчитываются в соответствии с ММ полученных ММПЭП, соответствующие динамики ИХ системы и отсеиваются те совокупности значений упомянутых параметров, при которых рассчитанные динамики ИХ не соответствуют статистике испытаний экземпляров рассматриваемой системы (рис. 4). На оставшихся динамиках ИХ строим преобразованную ММ, применимую для решения ПЗ (рис. 2) [13].

В полученную ММ, применимую для решения ПЗ (рис. 2), входят как аналитическое выражение общего решения ДУ полученных ММПЭП, так и упрощенные уравнения ММПЭП, полученные путем локального упрощения ФСНС [13]. Такое аналитическое выражение может быть построено путем разведочного анализа данных [6, 19] динамик, полученных в соответствии с приведенной на рис. 4 схемой, на предмет установившихся и переходных участков, участков возрастания/убывания, выпуклости/вогнутости, пересечения/непересечения фазовых кривых [13], которые и закладываются в упомянутое аналитическое выражение [13]. Это гарантирует корректность ММ, применимой для решения ПЗ (рис. 2) [13]. Таким образом, в соответствии со схемой, показанной на рис. 4, необходимо получить такое количество динамик состояния системы, которое будет полностью отражать выше-приведенные качественные особенности упомянутых динамик, а также перекрестные связи между опорными точками динамик системы в различных ее режимах работы (с точностью до взаимно-независимых опорных точек) [13]. И на этом множестве динамик состояния системы строить упомянутые ММ системы, применимые для решения ПЗ (рис. 2) [13].

Упомянутое множество динамик строится путем генерации совокупностей значений общих параметров системы, затем для каждой такой совокупности значений генерируем совокупности индивидуальных параметров системы и ее начальных состояний. На каждой такой совокупности динамик системы, полученных из ДУ на базе ММПЭП, для сгенерированной совокупности индивидуальных параметров системы и ее начального состояния, соответствующих конкретной совокупности значений общих параметров, вышеописанным путем строим ММ, применимую для решения ПЗ (рис. 2), выбрав и протестировав алгоритм ее обучения. Выбранный алгоритм обучения должен одинаково хорошо строить ММ, применимые для решения ПЗ (рис. 2), на всех совокупностях значений общих параметров.

Упрощение ДУ полученных ММПЭП, входящих в ММ, применимую для решения ПЗ (рис. 2), строится путем выбора областей фазового пространства системы, через которые проходят построенные в соответствии с показанной на рис. 4 схемой ее динамики, с последующим заданием упрощений ФСНС в выбранных областях фазового пространства. Полученная ММ, как нетрудно видеть из рис. 2, являющаяся физически информированной моделью машинного обучения [20], обучается на ЭД с последующим ее применением для решения ПЗ.

Результаты

Единая методика построения ММ систем различной физической и химической природы, применимых для решения различных ПЗ, на базе методов Data Science и ММПЭП имеет вид:

1. Выполняется постановка задачи построения ММ, применимой для решения ПЗ (рис. 2), в соответствии с требованиями заказчика: требуемая точность и допустимая сложность ММ, ее входные и выходные параметры [5, 7].
2. Выполняется сбор входных и соответствующих им выходных ЭД искомой ММ [5, 7].
3. Выполняется необходимая подготовка ЭД [5]: приводятся данные к требуемым единицам измерения, выполняется масштабирование и интеграция ЭД.
4. Выполняется исследование (объяснение) ЭД [5]:
 - 4.1. Разбивается динамика ИХ на участки, синтезируется ММПЭП (рис. 1, табл. 1) система ДУ динамики рассматриваемой системы и ее ИХ и КХ путем построения локально упрощенных ФСНС, опираясь на соответствующие участки динамик ИХ системы по схеме, показанной на рис. 3.
 - 4.2. Методами индукционного порождения регрессионных моделей строится ФСНС.
5. Выполняется аугментация ЭД:
 - 5.1. Оценивается из ЭД область значений параметров ДУ, полученных ММПЭП, по схеме, показанной на рис. 4.
 - 5.2. В полученной области значений вышеупомянутых параметров генерируется совокупность значений общих параметров и для каждой такой совокупности значений генерируется совокупность индивидуальных значений параметров системы и ее начального состояния.

5.3. Для сгенерированных совокупностей параметров рассчитывается в соответствии с ММ полученной ММПЭП, динамика системы и ее ИХ и КХ.

6. На множествах сгенерированных динамик состояния системы и ее ИХ и КХ, соответствующих совокупностям значений общих параметров, строится структура ММ, применимой для решения ПЗ (рис. 2) и отрабатываются алгоритмы обучения из ЭД этой ММ.

7. Обучается на обучающих ЭД полученная ММ, применимая для решения ПЗ, и проверяется на тестовых данных. При необходимости в соответствии с предыдущими шагами и корректируется полученная ММ, применимая для решения ПЗ.

В соответствии с полученной методикой строятся физически информированные ММ машинного обучения, не противоречащие законам физики, для обучения которых требуется относительно небольшой объем ЭД [20].

Обсуждение

Получаемые в соответствии с упомянутой методикой ММ, применимые для решения ПЗ, характеризуются простотой. Приведенная в ней аугментация ЭД необходима для анализа качественного характера динамик ФХП и перекрестных связей между динамиками процессов, что гарантирует физическую информированность ММ и ее обучаемость за приемлемое время [20].

Заключение

Предложенная методика построения ММ, применимых для ПЗ, систем различной физической и химической природы может быть положена в математическую основу программно-технологической платформы цифровых двойников. А полученные ММ, применимые для решения ПЗ, могут быть положены в основу математического ядра цифровых двойников.

Список литературы

1. Юрьевич Е. И. Основы проектирования техники. СПб. : Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012. 135 с.
2. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М. : Высш. шк., 1982. 231 с.
3. Колодежный Л. П., Чернодаров А. В. Надежность и техническая диагностика. М. : Изд-во ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2010. 452 с.
4. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб. : Профессия, 2003. 768 с.
5. Cielen D., Meysman A. D. V., Mohamed A. Introducing data science. Shelter Island, New York, USA : Manning Publications, 2017. 336 р.
6. Grus J. Data Science from Scratch. Beijing ; Boston ; Famham ; Sebastopol ; Tokyo : O'Reilly, 2021. 416 р.
7. Антонов А. В. Системный анализ. М. : Высш. шк., 2004. 454 с.
8. Eykhoff P. Systems identification: parameters and state estimation. Eindhoven, Netherlands : University of technology, 1975. 680 р.
9. Flach P. Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data. Cambridge : Cambridge University Press, 2015. 400 р.
10. Стрижов В. В. Методы индуктивного порождения регрессионных моделей. М. : Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, 2008. 56 с.
11. Старостин И. Е., Степанкин А. Г. Программная реализация методов современной неравновесной термодинамики и система симуляции физико-химических процессов SimulationNonEqProcSS v.0.1.0. Бобассен, Маврикий : Lambert academic publishing, 2019. 127 с.
12. Старостин И. Е., Халютин С. П., Париевский В. В. Виды и формы представления основных уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов // Электропитание. 2022. № 4. С. 4–14.
13. Старостин И. Е., Гавриленков С. И. Архитектура математического ядра цифровых двойников различных физико-химических систем на базе метода математического прототипирования энергетических процессов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 160–168. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-17
14. Старостин И. Е. Корректное задание функций состояния для диссипативной матрицы, входящей в уравнения метода математического прототипирования энергетических процессов // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 28–35. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-4
15. Старостин И. Е., Гавриленков С. И. Задание функций состояния для потенциалов взаимодействия, приведенных теплоемкостей и приведенных тепловых эффектов, входящих в уравнения метода математического прототипирования энергетических процессов // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 36–43. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-5

16. Старостин И. Е. К вопросу применения методов символьной регрессии для построения цифрового двойника различных физико-химических систем на базе метода математического прототипирования энергетических процессов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2025. Т. 1. С. 68–74.
17. Дзядзык В. К. Введение в теорию равномерного приближения функции полиномами. М. : Наука, 1977. 512 с.
18. Ланцов В. Н. Методы понижения порядка моделей сложных систем. Владимир : Изд-во ВлГУ, 2017. 84 с.
19. Bruce P., Bruce A. Practical Statistics for Data Scientists. Beijing ; Boston ; Farnham ; Sebastopol ; Tokio : O'Reilly, 2018. 304 с.
20. Garleo G. [et al.]. Machine learning and the physical sciences // Reviews of Modern Physics. 2019. № 91. P. 045002. doi: 10.1103/RevModPhys.91.045002

References

1. Yurevich E.I. *Osnovy proyektirovaniya tekhniki = Fundamentals of engineering design*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiy universitet, 2012:135. (In Russ.)
2. Barzilovich E.Yu. *Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnykh system = Models of maintenance of complex systems*. Moscow: Vyssh. shk., 1982:231. (In Russ.)
3. Kolodezhnyy L.P., Chernodarov A.V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika = Reliability and technical diagnostics*. Moscow: Izd-vo VVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina, 2010:452. (In Russ.)
4. Bessekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya = Theory of automatic control systems*. Saint Petersburg: Professiya, 2003:768. (In Russ.)
5. Cielen D., Meysman A.D.V., Mohamed A. *Introducing data science*. Shelter Island, New York, USA: Manning Publications, 2017:336.
6. Grus J. *Data Science from Scratch*. Beijing; Boston; Famham; Sebastopol; Tokyo: O'Reilly, 2021:416.
7. Antonov A.V. *Sistemnyy analiz = System analysis*. Moscow: Vyssh. shk., 2004:454. (In Russ.)
8. Eykhoff P. *Systems identification: parametrs and state estimation*. Eindhoven, Netherlands: University of technology, 1975:680.
9. Flach P. *Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015:400.
10. Strizhov V.V. *Metody induktivnogo porozhdeniya regressionnykh modeley = Methods of inductive generation of regression models*. Moscow: Vychislitel'nyy tsentr im. A.A. Dorodnitsyna RAN, 2008:56. (In Russ.)
11. Starostin I.E., Stepankin A.G. *Programmnaya realizatsiya metodov sovremennoy neravnovesnoy termodinamiki i sistema simulyatsii fiziko-khimicheskikh protsessov SimulationNonEqProcSS v.0.1.0. BoBassen = Software implementation of modern nonequilibrium thermodynamics methods and a system for simulating physico-chemical processes SimulationNonEqProcSS v.0.1.0. BoBassin*. Mavrikiy: Lambert academic publishing, 2019:127. (In Russ.)
12. Starostin I.E., Khalyutin S.P., Pariyevskiy V.V. Types and forms of representation of the basic equations of the method of mathematical prototyping of energy processes. *Elektropitanije = Power supply*. 2022;(4):4–14. (In Russ.)
13. Starostin I.E., Gavrilenkoy S.I. Architecture of the mathematical core of digital twins of various physico-chemical systems based on the method of mathematical prototyping of energy processes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):160–168. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-17
14. Starostin I.E. Correct assignment of state functions for a dissipative matrix included in the equations of the method of mathematical prototyping of energy processes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):28–35. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-4
15. Starostin I.E., Gavrilenkoy S.I. Setting state functions for interaction potentials, reduced heat capacities and reduced thermal effects included in the equations of the method of mathematical prototyping of energy processes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):36–43. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-5
16. Starostin I.E. On the issue of applying symbolic regression methods to build a digital twin of various physico-chemical systems based on the method of mathematical prototyping of energy processes. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2025;1:68–74. (In Russ.)
17. Dzyadzyk V. K. *Vvedeniye v teoriyu ravnomernogo priblizheniya funktsii polinomami = Introduction to the theory of uniform approximation of a function by polynomials*. Moscow: Nauka, 1977:512. (In Russ.)
18. Lantsov V.N. *Metody ponizheniya poryadka modeley slozhnykh system = Methods of lowering the order of models of complex systems*. Vladimir: Izd-vo VlGU, 2017:84. (In Russ.)
19. Bruce P., Bruce A. *Practical Statistics for Data Scientists*. Beijing; Boston; Farnham; Sebastopol; Tokio: O'Reilly, 2018:304.
20. Garleo G. et al. Machine learning and the physical sciences. *Reviews of Modern Physics*. 2019;(91):045002. doi: 10.1103/RevModPhys.91.045002

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Евгеньевич Старостин

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

Igor E. Starostin

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.05.2025

Поступила после рецензирования/Revised 18.06.2025

Принята к публикации/Accepted 02.07.2025

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 658.512.2:004.415.2
doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-5

МНОГОАГЕНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ НА ПРЕДПРИЯТИИ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Г. Х. Ирзаев¹, А. А. Адамова², Н. К. Юрков³

¹ Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Россия

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

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ irzajev@mail.ru, ² arinaadamova75@gmail.com, ³ yurkov_nk@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Современным радиоэлектронным предприятиям приходится поддерживать заинтересованность потребителей за счет постоянного совершенствования выпускаемых изделий, разработки новых модификаций и внесения инженерных изменений в конструкцию и технологию изготовления. Инженерные изменения требуют значительных усилий по их планированию, согласованию и внедрению на предприятии и проводятся в большинстве случаев в ручном режиме. Настоящее исследование ставит целью разработать многоагентную систему поддержки принятия решений по управлению инженерными изменениями в изделиях с использованием широких возможностей технологий искусственного интеллекта. **Материалы и методы.** На основе ранее разработанной авторами модели обслуживания инженерных изменений сформирована оригинальная ролевая модель взаимодействий агентов. Агенты, функционирующие в условиях неопределенной среды и отсутствия полной информации, используют для выводов когнитивные структуры данных и методы дедукции и индукции. **Результаты и выводы.** Предложена концепция системы, состоящей из четырех агентов и содержащей когнитивные структуры данных и методы логических выводов с обучением и адаптацией. Сформулированы локальные цели агентов в системе, раскрыты их роль и общая логика действий по поддержке принятия решений по внедрению инженерных изменений в изделиях радиоэлектроники. Разработана логическая архитектура агента-координатора, который запрашивает оптимальные время и стоимость реализации инженерных изменений и составляет график внедрения их на предприятии. Построены также архитектуры агента-прогностика, агента-оптимизатора и агента обратной связи. Модель имеет ограничения в виде появления внештатных ситуаций на предприятии, юридически значимых или критических для безопасности предприятия изменений, что требует перехода на ручное управление.

Ключевые слова: агент-координатор, агент обратной связи, агент-оптимизатор, агент-прогностик, инженерное изменение, искусственный интеллект, многоагентная система

Для цитирования: Ирзаев Г. Х., Адамова А. А., Юрков Н. К. Многоагентная система автоматического планирования и управления инженерными изменениями на предприятии радиоэлектроники // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 45–53. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-5

MULTI-AGENT SYSTEM FOR AUTOMATIC PLANNING AND MANAGEMENT OF ENGINEERING CHANGES AT A RADIODEVICE ENTERPRISE

G.Kh. Irzaev¹, A.A. Adamova², N.K. Yurkov³

¹ Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ irzajev@mail.ru, ² arinaadamova75@gmail.com, ³ yurkov_nk@mail.ru

Abstract. *Background.* Modern radio-electronic enterprises have to maintain consumer interest by continuously improving their products, developing new modifications and introducing engineering changes into the design and manufacturing technology. Engineering changes require significant efforts for their planning, coordination and implementation at the enterprise and are carried out in most cases manually. This study aims to develop a multi-agent decision support system for managing engineering changes in products using the wide capabilities of artificial intelligence technologies. *Materials and methods.* Based on the engineering change maintenance model previously developed by the authors, an original role model of agent interactions has been formed. Agents operating in an uncertain environment and lack of complete information use cognitive data structures and deduction and induction methods to draw conclusions. *Results and conclusions.* The concept of a system consisting of four agents and containing cognitive data structures and methods of logical inference with training and adaptation is proposed. Local goals of agents in the system are formulated, their role and general logic of actions to support decision-making on the implementation of engineering changes in electronic products are revealed. The logical architecture of the coordinator agent is developed, which requests the optimal time and cost of implementing engineering changes and makes a schedule for their implementation at the enterprise. Architectures of the forecaster agent, optimizer agent and feedback agent are also built. The model has limitations in the form of emergency situations at the enterprise, legally significant or critical changes for the safety of the enterprise, which requires switching to manual control.

Keywords: coordinator agent, feedback agent, optimizer agent, forecaster agent, engineering change, artificial intelligence, multi-agent system

For citation: Irzaev G.Kh., Adamova A.A., Yurkov N.K. Multi-agent system for automatic planning and management of engineering changes at a radiodevice enterprise. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):45–53. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-5

Введение

Генерация инженерных изменений (Ини), проработка конструкторско-технологической документации, согласование их со специалистами и внедрение связаны с целым рядом проблем, требующих исследований и разработки инструментария управления ими. Цикл проведения инженерных изменений на радиоэлектронные изделия включает в себя ряд этапов, показанных на рис. 1.



Рис. 1. Процесс генерации, проработки, согласования и внедрения инженерных изменений

Требования на Ини в изделиях могут генерировать как проектировщики изделия, так и технологии, материалovedы, специалисты подразделений, заказчики и другие из-за того, что целевые свойства продукта больше не соответствуют его фактическим свойствам. Отклонение может иметь как внутренние, так и внешние причины [1]. Внутренние причины инженерных изменений в изделии – это внутренние инновации и улучшения продукта, знания, полученные в процессе производства, сборки и управления качеством, сообщения о внутренних ошибках, организационные изменения

внутри предприятия, чрезмерно высокие затраты, ошибки проектирования из-за отсутствия знаний о продукте или условиях его использования. Внешними причинами можно считать, например, появление новых материалов и технологий, цифровизацию производственных процессов, изменения требований или тенденций рынка, запросов потребителей, улучшение аналогов у конкурентов, изменения комплектующих и компонентов, получаемых от поставщиков, изменения законов, стандартов, нормативно-технических документов, жалобы, отзывы и рекламации клиентов [2, 3]. Возникает необходимость в упорядочении связей и коммуникаций между исполнителями и службами, отвечающими за разработку, внесение ИИ в конструкторско-технологическую документацию и внедрение в производство, устранение разногласий между ними без повышения стоимости затрат.

Процесс внедрения ИИ включает в себя коммуникацию множества заинтересованных сторон и отделов на предприятии, которые свободно сотрудничают посредством действий координатора изменений. В условиях развития цифровой среды на промышленных предприятиях процессы управления ИИ, вносимыми в проектируемые и осваиваемые изделия, требуют автоматизации и интеллектуализации [4, 5]. Представление свободного сотрудничества между автономными субъектами, управление процессами внедрения ИИ становится возможным через многоагентную систему с возможностями искусственного интеллекта.

Согласно определению Рассела и Норвига [6], агент – это автономная сущность, которая воспринимает среду через датчики, на основе информации от которых он может действовать через исполнительные механизмы. Агенты способны осуществлять логические выводы в условиях получения неполной и противоречивой информации, они содержат когнитивные структуры данных и методы, реализующие дедуктивные или индуктивные выводы [7]. Кроме того, модель агента интегрирует механизмы рассуждения на основе знаний с нейросетевым (коннекционистским) подходом с обучением и адаптацией. Как справедливо отмечено в работе [8], взаимодействие агентов связано с переговорами и достижением согласия за счет интерактивного обмена информацией в форме предложений и контрпредложений.

Модель многоагентной системы управления инженерными изменениями

Разработана ролевая модель взаимодействий, происходящих в многоагентной системе поддержки принятия решений по управлению ИИ (рис. 2). Ролевой аспект охватывает возможные специализации агентов и то, как они могут быть связаны друг с другом [9].

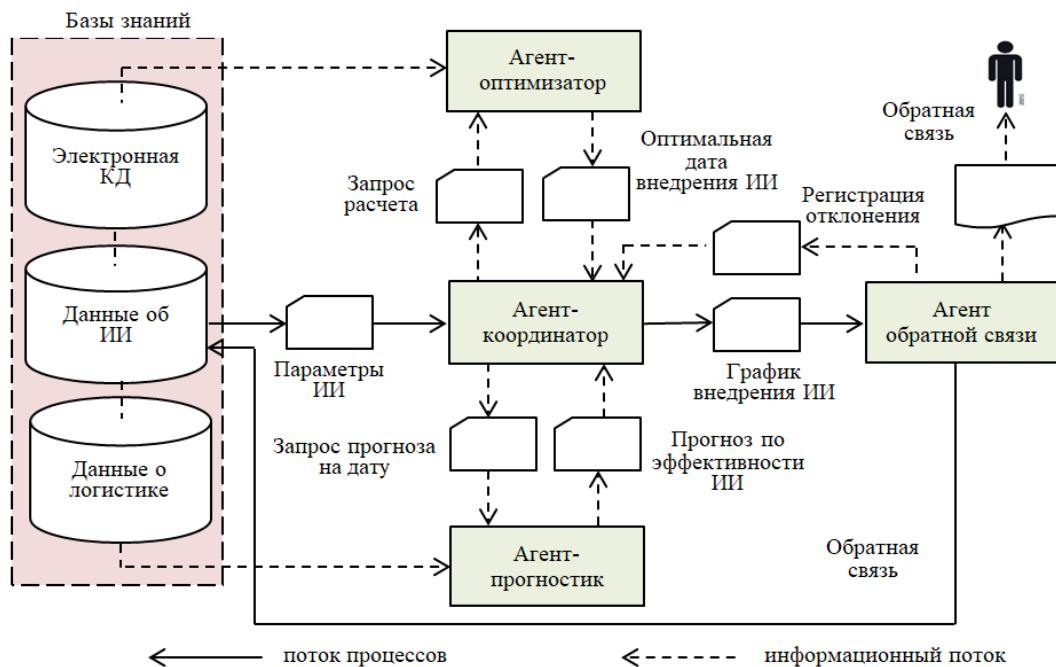


Рис. 2. Модель многоагентной системы внедрения ИИ на предприятии

Роль – своего рода абстракция поведения агента, его обязанностей, в данном случае при организации процессов внедрения ИИ в изделиях на предприятии. Она дает представление об общих функциях агентов, которые будут расширены по мере детализированной разработки многоагентной

системы. Цели агентов в системе можно сформулировать следующим образом в соответствии с задачами, описанными в работе [10]:

Ц1 – определение оптимальных для предприятия сроков вступления в силу Инициативы на уровне деталей или сборочных единиц;

Ц2 – выработка прогноза о введении Инициативы на деталь (сборочную единицу) в соответствии с принятым на предприятии регламентом и в зависимости от данных других участников согласования Инициативы;

Ц3 – предоставление графика внедрения Инициативы в соответствии с результатами достижения целей Ц1 и Ц2;

Ц4 – предоставление обратной связи.

Цель Ц1 может включать в себя также пакетирование Инициативы одной причиной возникновения для группы изделий одного класса, это снижает затраты и сложность внедрения изменений. При автоматизации процессов на предприятии выполнить Ц2 – предсказать дату внедрения изменения – можно через приложения искусственного интеллекта, используя данные из нескольких источников. Ц3 способствует автоматизации планирования Инициативы, что значительно улучшает эксплуатацию дополнительных мощностей и ресурсов, необходимых для их внедрения на предприятии. Ц4 позволяет контролировать процессы и осуществлять при необходимости ручное вмешательство.

На рис. 2 показано, как агент-координатор управляет задачами и предоставляет график внедрения Инициативы. При поступлении нового Инициативы он запрашивает расчет оптимальных значений дат вступления в силу изменений с точки зрения минимальных затрат (эффективности изменения). Агентом запрашивается также прогноз по показателю эффективности изменения. Агент сравнивает дату и прогноз по эффективности с идентифицированным набором правил. Если результат – в пределах приемлемых величин, Инициатива планируется в производственной сети, иначе – агент-координатор повторно запускает агента-оптимизатора, запрашивая поиск следующего лучшего локального оптимума.

Агент-оптимизатор обращается к первой цели для определения оптимальной даты внедрения Инициативы с точки зрения стоимости и времени. Перед расчетом оптимальных значений агент должен провести классификацию изменения и идентифицировать его тип для связывания с затратами на его внедрение. Информация предоставляется агенту-координатору. Исполнительные механизмы агента-оптимизатора могут быть разработаны как закодированные параметры генетического алгоритма в сочетании с поиском.

Агент-прогностик выполняет Ц2 и предоставляет агенту-координатору доверительный интервал точности внедрения инженерного изменения и оценку воздействия. Его поток управления достаточно простой, так как при инициализации агенту поручается прогнозировать эффективность внедрения для всех заданных дат. После расчета прогноза результат возвращается для сопоставления с набором правил агента-координатора. Прогностик – обучающийся агент, постоянно улучшающий свои прогнозы с помощью данных прошлых изменений.

Агент обратной связи в соответствии с Ц4 обеспечивает информацией человека в случае необходимости ручного управления и вносит изменения в базы знаний. Контролируя график внедрения Инициативы, он в случае выявления каких-либо отклонений информирует оператора-человека и агента-координатора. Агенту должен быть предоставлен базовый набор правил, согласно которым отклонения считаются достаточно серьезными, чтобы потребовать проверки графика внедрения изменений или даже отменить само Инициативу.

Для каждого агента необходима среда задачи, определяемая показателем производительности, исполнительным механизмом и датчиком. Эти показатели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели агентов системы внедрения Инициативы на предприятии

Показатели	Агент				
	координатор	оптимизатор	прогностик	обратной связи	
1	2	3	4	5	
Производительность	Точность планирования	Стоимость реализации и время	Качество прогноза	Ручное вмешательство	
Среда	Данные об Инициативе	Проектирование, логистика, данные об Инициативе	Прошлые и текущие данные о логистике, данные проектирования, данные об Инициативе	Расписание Инициативы	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Исполнительный механизм	Запрос расчета, запрос прогнозирования, алгоритм сравнения, планирование Ини, запрос на ручное управление	Алгоритм классификатора, алгоритм расчета	Алгоритм прогнозирования	Запросы прогнозирования, конфигурация Ини, данные процесса и синхронизации
Датчики	Конфигурация Ини, расчет, прогнозирование, информация о реализации, проверка планирования	Конфигурация Ини, запросы на расчет, данные цепочки поставок, данные о продукте, график производства	Проверка планирования запрос, обратная связь, распределение	Данные графика Ини, данные прогнозирования, данные процесса и синхронизации

Архитектура и функции агентов системы управления инженерными изменениями

Главный агент всей системы – координатор, осуществляет согласование задач с другими агентами и предоставляет график внедрения Ини, выполняя цель Ц1. Разработанный как агент, нацеленный на обучение, он имеет логическую архитектуру, показанную на блок-схеме (рис. 3). Решения принимаются не последовательно, а скорее одновременно, отталкиваясь от информации, полученной от датчиков, которые позволяют воспринимать агенту окружающую среду и действовать в зависимости от текущего состояния.

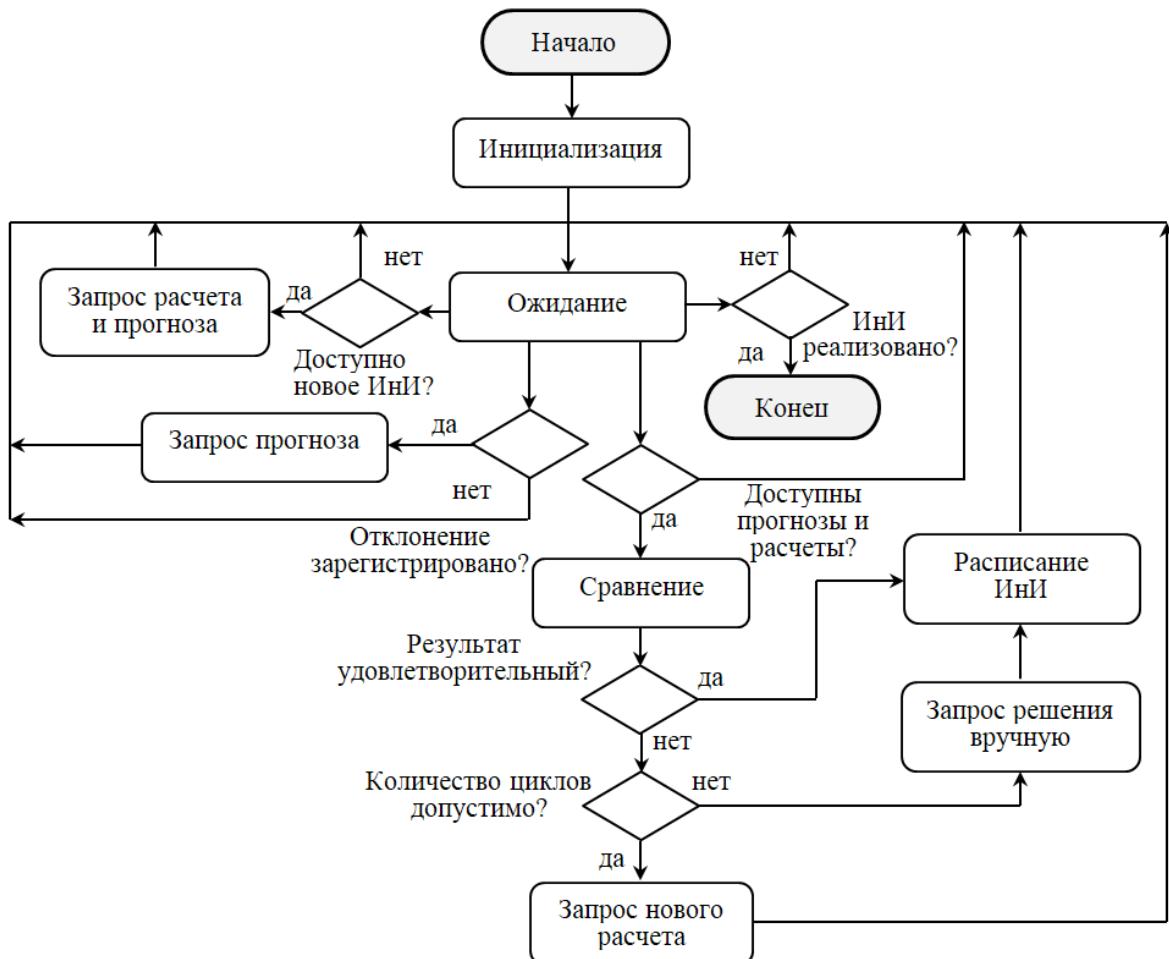


Рис. 3. Логическая архитектура агента-координатора

После инициализации агент находится в состоянии ожидания доступа к новому требованию на ИНиИ. После его получения агент-координатор запрашивает расчет оптимальных значений времени реализации и стоимости ИНиИ. Кроме того, запрашивается прогноз эффективности внедрения конкретного ИНиИ. При наличии оптимального прогноза агент сравнивает прогнозируемый эффект и идентифицированную дату с набором правил. Если полученная сравнительная оценка находится в приемлемых пределах, то ИНиИ планируется в производственной сети, иначе – агент-координатор повторно запускает агента-оптимизатора, запрашивая поиск следующего лучшего локального оптимума, перезапуская цепочку «оптимизация – прогнозирование – график внедрения».

Если от агента обратной связи не получен запрос на управление расписанием, агент-координатор остается в состоянии ожидания до получения подтверждения от ИНиИ, что приводит к его завершению. Однако если зафиксировано отклонение, агент-координатор запрашивает новый прогноз для переоценки ситуации и в зависимости от результата расписание подтверждается или требуется новый оптимальный расчет, фактически перезапускается последовательность «оптимизация – прогнозирование – график внедрения». Наконец, следует установить ограничение на количество циклов, которые могут быть перезапущены, и в случае, если глобальный оптимум не достигается, запрашивается ручное переопределение или решение.

Факторы, которые необходимо учитывать при разработке агента-координатора, – частота проверки, концепция хранения данных и набор правил. Если первый и второй факторы ограничены вычислительными ресурсами, то набор правил уникален в соответствии с требованиями конкретного предприятия. В качестве показателя производительности предлагается точность планирования (табл. 1), поскольку эта метрика позволяет агенту-координатору автономно улучшать и адаптировать набор правил с течением времени, повышая точность и эффективность будущих графиков внедрения ИНиИ. Для улучшения работы агента предложен алгоритм обучения с подкреплением, который заключается в том, что сначала работа агентов должна контролироваться человеком, пока не будет накоплен опыт и собраны данные.

Агент-оптимизатор представляет достижение цели Ц1 и задачу поиска оптимальных сроков внедрения инженерного изменения с точки зрения минимальных затрат материальных ресурсов и времени (рис. 4). Кроме этого, оптимизатор должен идентифицировать тип изменения и привязанную к нему стоимость затрат. Требуется отдельное исследование того, какая классификация лучше: основанная на правилах или машинном обучении. После определения глобального оптимума и классификации типа изменения информация предоставляется агенту-координатору и агент-оптимизатор возвращается в состояние ожидания. Если получен дополнительный запрос на расчет, оптимизатор ищет вторую лучшую дату вступления в силу ИНиИ. После уведомления о том, что ИНиИ запланировано, агент прекращает работу.

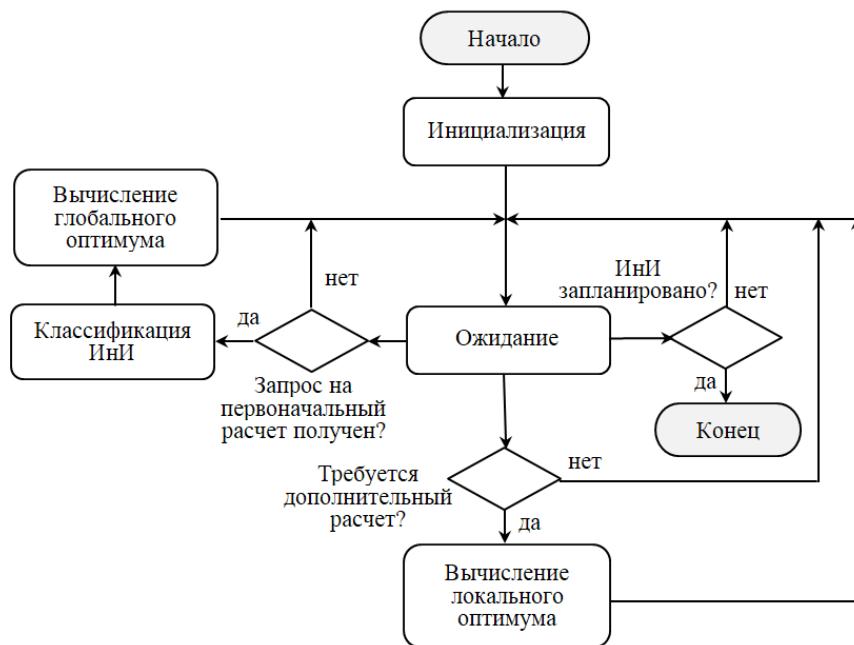


Рис. 4. Логическая архитектура агента-оптимизатора

Агент-прогностик обращается к выполнению Ц2 – прогнозированию эффекта от внедрения ИИ. Поэтому он предоставляет координатору доверительный интервал точности внедрения и оценку воздействия. Его поток управления (рис. 5) довольно прост, так как при инициализации агенту поручается прогнозировать эффективность для всех заданных дат и текущей информации об ИИ. После расчета прогноза для этих эффектов результат возвращается для сопоставления с набором правил агента-координатора. Прогностик является обучающимся агентом, постоянно улучшающим свои прогнозы с помощью данных прошлых изменений. Он имеет самый большой объем потребления данных, для алгоритма прогнозирования предложена контролируемая модель массового обслуживания.

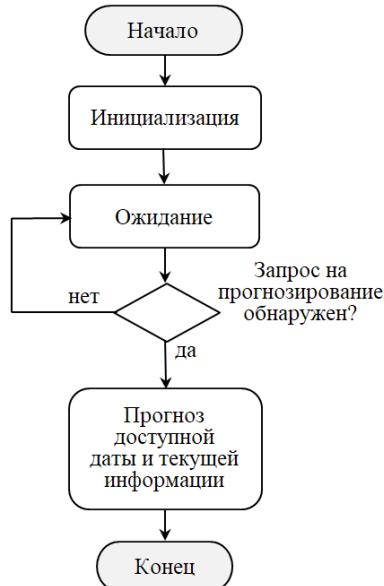


Рис. 5. Логическая архитектура агента-прогностика

Агент обратной связи имеет логическую архитектуру, показанную на рис. 6, и предоставляет предложения для выполнения Ц4. Его цель – контролировать график внедрения ИИ и в случае обнаружения отклонений информировать об этом человека-оператора либо агента-координатора.

Первоначально должен быть предоставлен базовый набор правил, по которым отклонения считаются достаточно серьезными, чтобы потребовать проверки расписания или даже отмены ИИ. В настоящее время основная сложность заключается в прогнозировании результата этапа в зависимости от прошедшего времени. Это единственный агент, который зависит от человека-машинного интерфейса, мерой его производительности является количество ручных вмешательств в процесс рассмотрения ИИ. Случай ручного управления могут быть использованы агентом для изучения и улучшения набора правил отклонения с помощью алгоритма обучения с подкреплением.

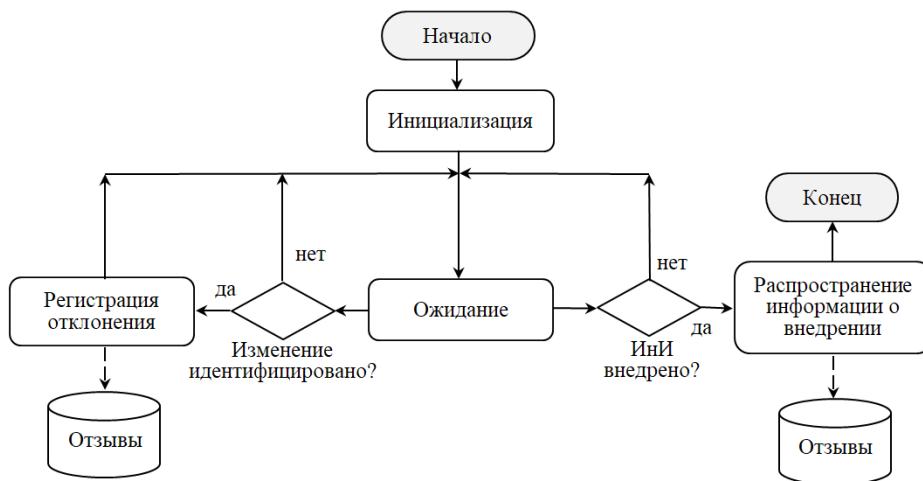


Рис. 6. Логическая архитектура агента обратной связи

Заключение

В статье представлена концепция многоагентной системы для автоматического планирования внедрения ИНи на предприятии. Определены четыре цели для эффективного планирования системы, для их выполнения введены четыре агента. Обсуждены логика действий и цели каждого агента. Необходимо отметить ряд ограничений, накладываемых на функционирование многоагентной системы. Они связаны с непредсказуемым возникновением на предприятии внештатных ситуаций, связанных с появлением и внедрением некоторых ИНи. Кроме того, при внедрении юридически значимых или критических для безопасности изменений, они должны быть проверены и одобрены только человеком. Невозможность предугадать все вероятные исходы взаимодействия автономных агентов может привести к непредсказуемому поведению системы управления ИНи, что связано с естественной ограниченностью моделей неоднородных агентов, а также не всегда формализуемой логикой поведения их при совместном решении задач [11]. Однако предложенная модель с учетом ограничений будет совершенствоваться, компоненты модели уточняться, в дальнейшем возможно введение в модель других агентов.

Благодаря разработанной многоагентной системе на предприятиях с многочисленными ИНи в ходе проектирования, освоения и производства изделий можно будет оказать поддержку внедрению инженерных изменений, используя возможности искусственного интеллекта. За счет этого сократить временные и материальные затраты на проведение и внедрение ИНи, улучшить организационные и коммуникационные возможности подразделений предприятия.

Список литературы

1. Ирзаев Г. Х. Анализ процессов внесения инженерных изменений в конструкцию радиоэлектронных средств на этапах проектирования и освоения серийного производства // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 11. С. 72–78.
2. Wooldridge M., Jennings N. R., Kinny D. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. 2000. Vol. 3, № 3. P. 285–312.
3. Wildemann H. Änderungs management, Leitfaden zur Einführung eineseffizienten Managements technischer Änderungen. München : Tcwtransfer-Centrum, 2006.
4. Ehrlenspiel K. Integrierte Produkt entwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München ; Wien, 2007.
5. Ирзаев Г. Х. Управление инженерными изменениями в изделиях радиоэлектронного приборостроения с помощью технологий виртуальной и дополненной реальности // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2024. № 1. С. 130–140.
6. Russell S. J., Norvig P. Artificial intelligence: A modern approach, Always learning, Third edition, Global edition, Pearson. Boston ; Columbus ; Indianapolis, 2016.
7. Лихтенштейн В. Е., Конявский В. А., Росс Г. В., Лось В. П. Мультиагентные системы: самоорганизация и развитие. М. : Финансы и статистика, 2018. 264 с.
8. Романчева Н. И. Особенности использования мультиагентных технологий в киберсоциальных системах // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 1. С. 79–82.
9. Юрков Н. К., Бецков А. В., Самокутяев А. М. Мультиагентное управление сложными динамическими системами // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 6–12.
10. Potdar P., Jonnalagedda V. Design and development of a framework for effective engineering change management in manufacturing industries // International Journal of Product Lifecycle Management. 2018. Vol. 11, № 4. P. 368.
11. Маслобоев А. В. Обобщенная методология построения мультиагентных систем управления жизнеспособностью критических инфраструктур // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 134–146.

References

1. Irzayev G.Kh. Analysis of the processes of making engineering changes to the design of electronic means at the stages of design and development of mass production. *Voprosy radioelektroniki = Radio electronics issues*. 2016;(11):72–78. (In Russ.)
2. Wooldridge M., Jennings N.R., Kinny D. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2000;3(3):285–312.
3. Wildemann H. Änderungs management, Leitfaden zur Einführung eineseffizienten Managements technischer Änderungen. München: Tcwtransfer-Centrum, 2006.
4. Ehrlenspiel K. *Integrierte Produkt entwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München; Wien, 2007.
5. Irzayev G.Kh. Management of engineering changes in electronic instrumentation products using virtual and augmented reality technologies. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2024;(1):130–140. (In Russ.)

6. Russell S.J., Norvig P. *Artificial intelligence: A modern approach, Always learning, Third edition, Global edition*, Pearson. Boston; Columbus; Indianapolis, 2016.
7. Likhtenshteyn V.E., Konyavskiy V.A., Ross G.V., Los' V.P. *Mul'tiagentnyye sistemy: samoorganizatsiya i razvitiye = Multi-agent systems: self-organization and development*. Moscow: Finansy i statistika, 2018:264. (In Russ.)
8. Romancheva N.I. Features of the use of multi-agent technologies in cybersocial systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;1:79–82. (In Russ.)
9. Yurkov N.K., Betskov A.V., Samokutyayev A.M. Multi-agent management of complex dynamic systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:6–12. (In Russ.)
10. Potdar P., Jonnalagedda V. Design and development of a framework for effective engineering change management in manufacturing industries. *International Journal of Product Lifecycle Management*. 2018;11(4):368.
11. Masloboev A.V. Generalized methodology for building multi-agent systems for managing the viability of critical infrastructures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):134–146. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Гамид Хайбулаевич Ирзаев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры программного
обеспечения вычислительной техники
и автоматизированных систем,
Дагестанский государственный
технический университет
(Россия, Республика Дагестан, г. Махачкала,
пр-кт И. Шамиля, 70)
E-mail: irzajev@mail.ru

Gamid Kh. Irzaev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department of software,
computer science and automated systems,
Daghestan State Technical University
(70 I. Shamil avenue, Makhachkala,
Republic of Daghestan, Russia)

Арина Александровна Адамова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(национальный университет)
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1)
E-mail: arinaadamova75@gmail.com

Arina A. Adamova

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department of design
and production technology of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Николай Кондратьевич Юрков

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

Nikolay K. Yurkov

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 11.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 12.05.2025

Принята к публикации/Accepted 08.06.2025

ЛОКАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ПЕЛЕНГОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-КОНTRАСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

**А. А. Коваль¹, Д. А. Капустин², Г. В. Короп³,
С. В. Онопченко⁴, Р. Н. Сентяй⁵, В. В. Швыров⁶**

^{1, 2, 4, 5, 6} Луганский государственный педагогический университет, Луганск, Россия

³ ООО «Авиакомпания Волга-Днепр», Москва, Россия

¹ navigatorsystem@yandex.ru, ² kap-kapchik@mail.ru, ³ korop_g@mail.ru,

⁴ osv260176@rambler.ru, ⁵ sentyayroman@yandex.ru, ⁶ slavik_asas@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Анализируется содержание подходов и технологий разработки локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных элементов его конструкции. Материалы и методы. Представлены варианты пространственной компоновки измерительных элементов системы и их влияние на точность позиционирования беспилотного летательного аппарата. Результаты и выводы. Формулируется принцип работы локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции. Приводится алгоритм и математическая модель работы такой системы.

Ключевые слова: система координат, локальная система пространственного позиционирования БПЛА, математическая модель, температурно-контрастные элементы конструкции БПЛА

Для цитирования: Коваль А. А., Капустин Д. А., Короп Г. В., Онопченко С. В., Сентяй Р. Н., Швыров В. В. Локальная система пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных элементов его конструкции // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 54–69. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-6

A LOCAL SPATIAL POSITIONING SYSTEM FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE BASED ON THE BEARING OF TEMPERATURE-CONTRAST ELEMENTS OF ITS DESIGN

A.A. Koval¹, D.A. Kapustin², G.V. Korop³, S.V. Onopchenko⁴, R.N. Sentyay⁵, V.V. Shvyrov⁶

^{1, 2, 4, 5, 6} Lugansk State Pedagogical University, Lugansk, Russia

³ Volga-Dnepr Airlines, Moscow, Russia

¹ navigatorsystem@yandex.ru, ² kap-kapchik@mail.ru, ³ korop_g@mail.ru,

⁴ osv260176@rambler.ru, ⁵ sentyayroman@yandex.ru, ⁶ slavik_asas@mail.ru

Abstract. Background. The content of approaches and technologies for the development of a local spatial positioning system for an unmanned aerial vehicle based on the bearing of temperature-contrasting elements of its design is analyzed. **Materials and methods.** The variants of the spatial arrangement of the measuring elements of the system and their effect on the accuracy of the unmanned aerial vehicle positioning are presented. **Results and conclusions.** The principle of operation of a local spatial positioning system of an unmanned aerial vehicle based on the bearing of temperature-contrast (color-contrast) elements of its design is formulated. The algorithm and mathematical model of such a system are given.

Keywords: coordinate system, local UAV spatial positioning system, mathematical model, temperature-contrasting elements of the UAV design

For citation: Koval A.A., Kapustin D.A., Korop G.V., Onopchenko S.V., Sentyay R.N., Shvyrov V.V. A local spatial positioning system for an unmanned aerial vehicle based on the bearing of temperature-contrasting elements of its design. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(3):54–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-6

Постановка проблемы

В настоящее время в процессе подготовки операторов беспилотных авиационных систем активно используются тренажеры. Такие тренажеры позволяют сформировать необходимые начальные навыки в дистанционном пилотировании беспилотным летательным аппаратом (БПЛА), навыки их пространственного позиционирования.

Под пространственным позиционированием БПЛА следует понимать процесс определения его пространственно-временных координат с целью вывода в заданную точку пространства. Процесс пространственного позиционирования лежит в основе точной пространственной навигации БПЛА и, следовательно, в основе выполнения любого полетного задания.

В настоящее время существуют различные системы определения пространственных координат БПЛА. В частности, такими системами являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), глобальные спутниковые навигационные системы (ГЛОНАСС, GPS), системы оптической (визуальной) одометрии и т.п.

В процессе тренажерной подготовки операторов беспилотных авиационных систем (БАС) важнейшей задачей является оценка точности работы оператора в позиционировании БПЛА, точности выполнения пространственных маневров, определения координат объектов (целей), сброса грузов и т.п.

Таким образом, непрерывное определение точных фактических координат БПЛА является необходимым условием как выполнения полетного задания, так и оценки действий оператора БАС.

Тренажерная подготовка операторов БАС проводится, как правило, на малом тактическом полигоне или в закрытом помещении соответствующих размеров. Поэтому для определения координат БПЛА требуется относительно недорогая, автономная и достаточно точная система пространственного позиционирования.

В настоящее время разработано и используется для этих целей несколько таких автономных систем. В частности, к таким системам можно отнести ультразвуковую и инфракрасную локальные системы позиционирования. Все такие системы решают задачу локального позиционирования БПЛА, хотя и имеют ряд ограничений их применения.

Стремительное расширение использования тренажеров для целей подготовки операторов БАС, а также ряд ограничений, связанных с использованием тренажерного оборудования в закрытых помещениях выявляют необходимость разработки новых автономных локальных систем позиционирования БПЛА с высокими точностными характеристиками.

Целью исследования, приведенного ниже, является разработка концептуальной модели локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции.

Объектом исследования являются автономные системы локального пространственного позиционирования беспилотных летательных аппаратов.

Предметом исследования является математическая модель и алгоритмы функционирования локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции.

Вид исследования: прикладное исследование, математическое моделирование.

Методы исследования: изучение документов, математическое моделирование, статистический анализ, структурная декомпозиция, систематизация, классификация, анализ, сравнение, обобщение, физическое моделирование, агрегация, наблюдение, измерение, эксперимент.

Концептуальная модель алгоритма пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов конструкции БПЛА

Представленная ниже концептуальная модель локальной системы пространственного позиционирования БПЛА на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции основана на возможности определения направлений на характерный элемент конструкции БПЛА из точки стационарного размещения видеокамеры. Один из способов определения направлений на характерный элемент конструкции БПЛА из точки стационарного размещения видеокамеры показан на рис. 1.

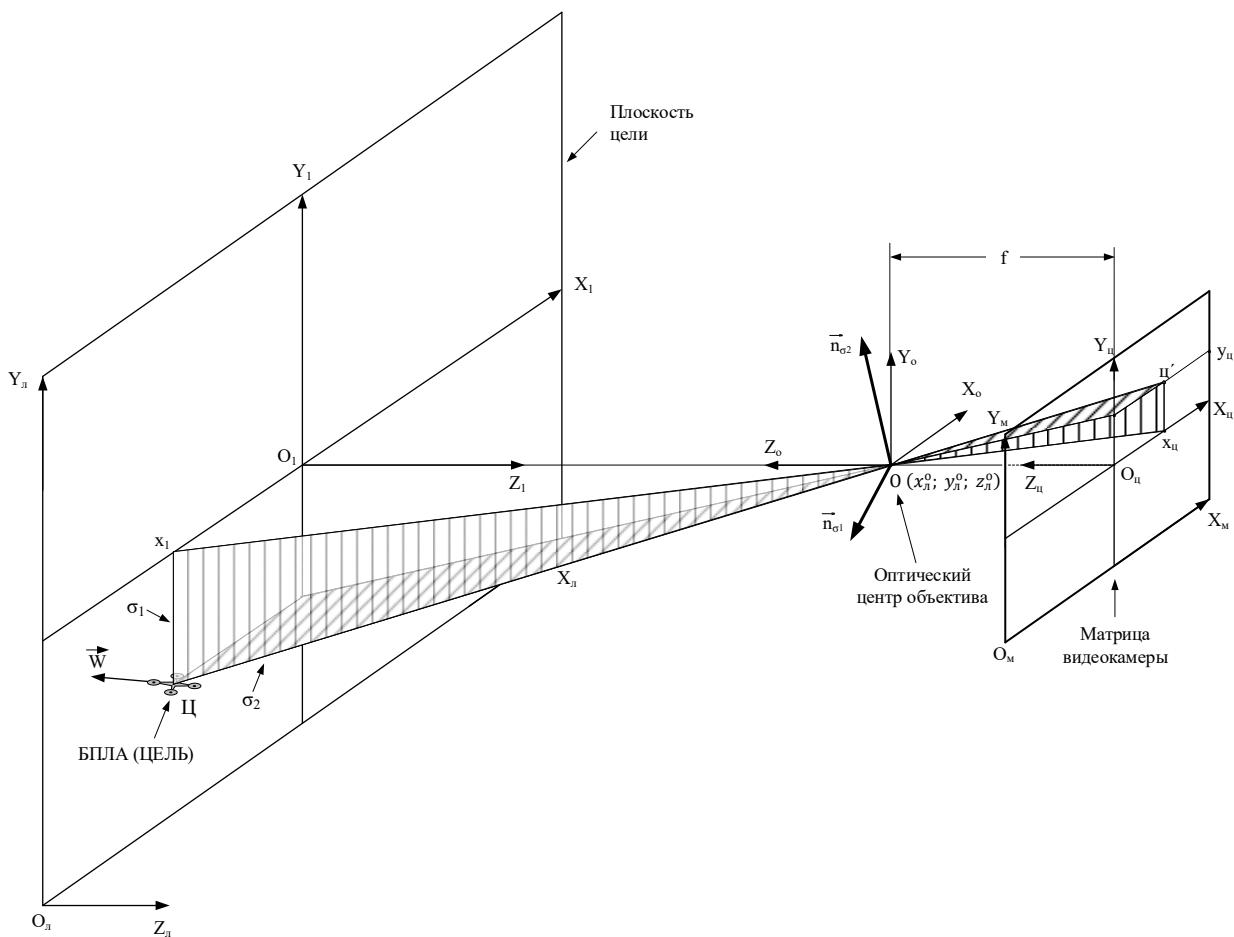


Рис. 1. Принцип определения направлений на характерный элемент конструкции БПЛА из точки стационарного размещения видеокамеры путем формирования двух плоскостей пеленгования

На рис. 1 показана матрица видеокамеры и три связанных с ней системы координат [1, 2]: пространственная прямоугольная система координат матрицы $O_M X_M Y_M Z_M$, пространственная система координат цели $O_l X_l Y_l Z_l$ и пространственная система координат $O_o X_o Y_o Z_o$, совмещенная с оптическим центром объектива. В обозначенных системах координат координаты точек метрические и измеряются в долях метра.

Параллельно плоскости матрицы видеокамеры расположена плоскость цели. С плоскостью цели связаны две пространственные системы координат: локальная система координат $O_l X_l Y_l Z_l$ и вспомогательная система координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$. В этих системах координат определяются пространственная ориентация и координаты центра матрицы видеокамеры, координаты фокуса видеокамеры $O_F(x_1; y_1; z_1)$, координаты векторов нормалей к плоскостям пеленгования \vec{n}_{σ_1} и \vec{n}_{σ_2} , плоскости пеленгования σ_1 и σ_2 (на рис. 1 выделены вертикальной и горизонтальной штриховкой), текущие координаты БПЛА.

Ориентация плоскостей пеленгования σ_1 и σ_2 в пространстве в системе координат $O_o X_o Y_o Z_o$, совмещенной с оптическим центром объектива, определяется векторами нормалей \vec{n}_{σ_1} и \vec{n}_{σ_2} . Как будет показано дальше, координаты этих векторов могут быть рассчитаны через координаты цели ($x_{\text{ц}}^{\text{бл}}; y_{\text{ц}}^{\text{бл}}; z_{\text{ц}}^{\text{бл}}$) в системе координат цели $O_l X_l Y_l Z_l$ и координаты оптического центра объектива $O(x_o^0; y_o^0; z_o^0)$ в локальной системе координат.

Таким образом, плоскости пеленгования БПЛА (цели) σ_1 и σ_2 могут быть однозначно определены через свои векторы нормалей \vec{n}_{σ_1} и \vec{n}_{σ_2} и координаты оптического центра объектива $O(x_o^0; y_o^0; z_o^0)$ как точки, принадлежащие этим плоскостям.

Другой способ определения направления на характерный элемент конструкции БПЛА из точки стационарного размещения видеокамеры показан на рис. 2.

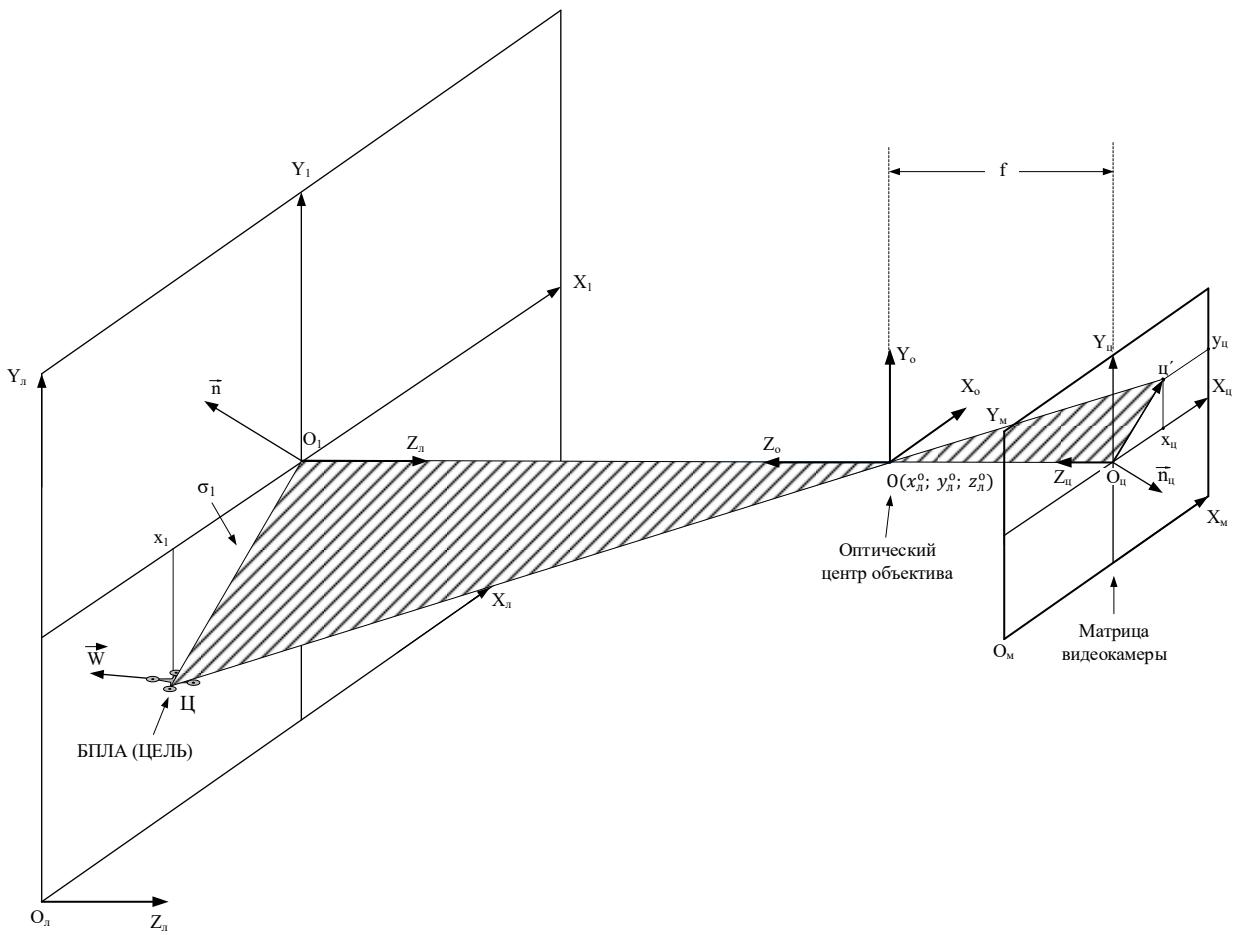


Рис. 2. Принцип определения направлений на характерный элемент конструкции БПЛА из точки стационарного размещения видеокамеры путем формирования одной плоскости пеленгования

На рис. 2 показана матрица видеокамеры и три связанных с ней системы координат: пространственная прямоугольная система координат матрицы $O_M X_M Y_M Z_M$, пространственная система координат цели $O_L X_L Y_L Z_L$ и пространственная система координат $O_O X_O Y_O Z_O$, совмещенная с оптическим центром объектива видеокамеры. В обозначенных системах координат координаты точек метрические и изменяются в долях метра.

Параллельно плоскости матрицы видеокамеры расположена плоскость цели. С плоскостью цели связаны две пространственные системы координат: локальная система координат $O_L X_L Y_L Z_L$ и вспомогательная система координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$. В этих системах координат определяются пространственная ориентация и координаты центра матрицы видеокамеры, координаты оптического центра объектива видеокамеры $O(x_o^0; y_o^0; z_o^0)$, координаты вектора нормали \vec{n}_{σ_1} к плоскости пеленгования σ_1 (на рис. 1 плоскость пеленгования выделена штриховкой), текущие координаты БПЛА на матрице видеокамеры $(x_u^{\text{бла}}; y_u^{\text{бла}}; z_u^{\text{бла}})$.

В отличие от первого способа, во втором способе для построения одного вектора нормали \vec{n}_{σ_1} к плоскости пеленгования σ_1 необходимо знание двух координат цели $(x_u^{\text{бла}}; y_u^{\text{бла}})$, измеренных в системе координат цели $O_L X_L Y_L Z_L$.

Характерной особенностью второго способа построения вектора нормали \vec{n}_{σ_1} к плоскости пеленгования БПЛА σ_1 является его независимость от координат фокуса и фокусного расстояния видеокамеры. Как будет показано ниже, еще одним преимуществом второго способа является возможность построения направления плоскости пеленгования с одной видеокамеры в диапазоне от 0 до 360°.

Совмещение первого и второго способа дает возможность построить пеленгаторную базу, позволяющую однозначно определять пространственное положение (координаты) пеленгуемого объекта (БПЛА) в локальной системе координат $O_L X_L Y_L Z_L$, связанной с учебным полигоном тренажера

оператора БПЛА. Вариант построения пеленгаторной базы локальной системы позиционирования БПЛА представлен на рис. 3.

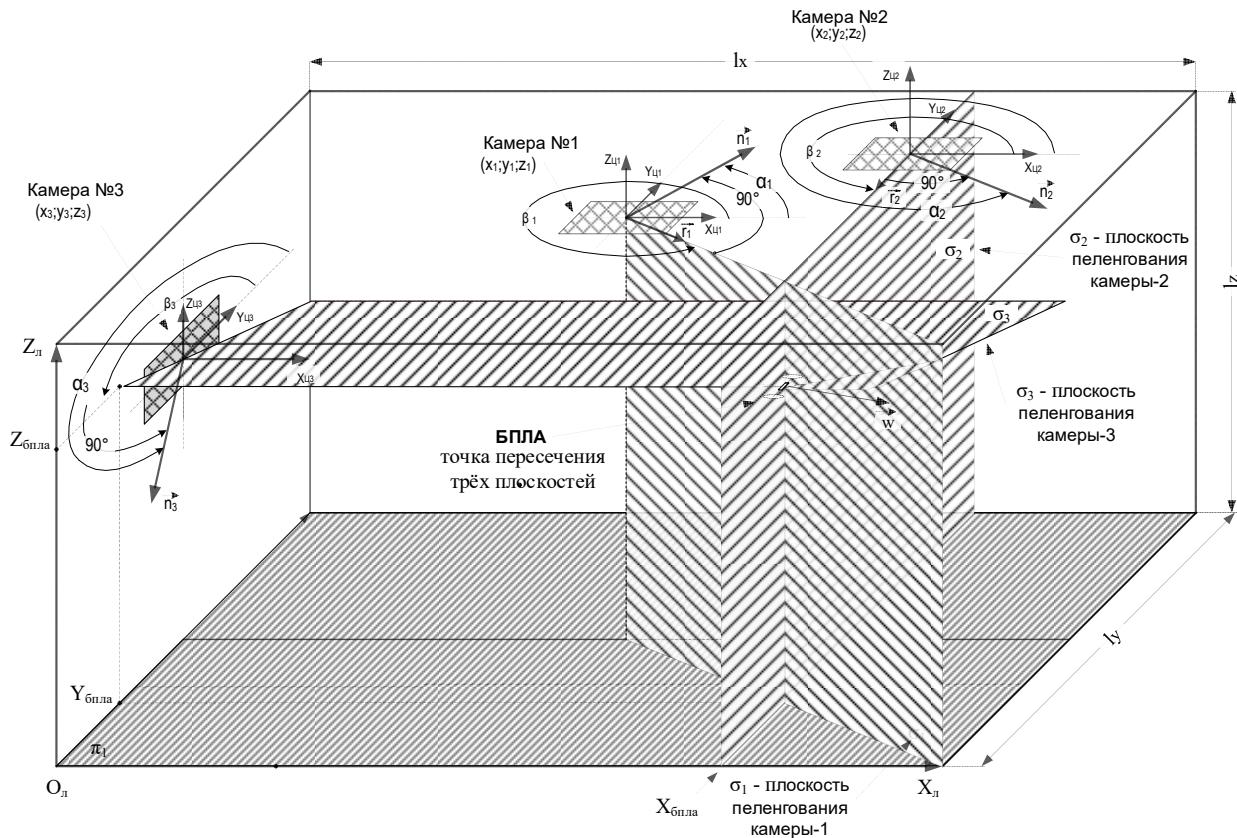


Рис. 3. Принцип построения пеленгаторной базы локальной системы пространственного позиционирования БПЛА, построенной на основе видеокамер

Координатную основу системы пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов конструкции БПЛА представляет локальная система прямоугольных пространственных координат $O_Lx_Ly_Lz_L$. В этой системе задаются координаты центров видеоматриц, фокусов видеокамер, оптических центров объективов видеокамер, углы ориентации фотоматриц видеокамер, определяются пространственные границы области измерения и контроля координат БПЛА, собственно координаты БПЛА и параметры его движения.

В процессе работы системы пеленгования на матрицах видеокамер формируется изображение БПЛА, которое в реальном масштабе времени с помощью программного алгоритма преобразуется в точку с пиксельными ($x_{\pi_i}^{\text{бла}}; y_{\pi_i}^{\text{бла}}$) и соответствующими метрическими ($x_{M_i}^{\text{бла}}; y_{M_i}^{\text{бла}}$) координатами.

По определенным метрическим прямоугольным координатам характерной точки БПЛА в плоскости фотоматрицы определяются отклонения горизонтальных и вертикальных углов визирования на БПЛА относительно центральной точки фотоматрицы.

Определенные таким образом горизонтальные и вертикальные углы визирования БПЛА, а также координаты оптических центров объективов и фокусов видеокамер в локальной системе координат позволяют определить параметры плоскостей пеленгования БПЛА.

При определенных условиях (о них будет сказано ниже) пересечением трех таких плоскостей определяют точку в пространстве, координаты которой соответствуют координатам характерной точки БПЛА. На рис. 3 в локальной системе прямоугольных пространственных координат $O_Lx_Ly_Lz_L$ показано пересечение трех плоскостей σ_1 , σ_2 и σ_3 , сформированных с помощью видеокамер № 1, 2 и 3.

Математическая модель и алгоритм определения локальных координат БПЛА

Плоскость пеленгования может быть однозначно определена в локальной системе координат $O_Lx_Ly_Lz_L$, если заданы координаты вектора нормали к плоскости и координаты любой точки этой плоскости.

Графическая модель и алгоритм определения параметров плоскости пеленгования БПЛА относительно точки стационарного размещения видеокамеры показаны на рис. 4.

В нижней части рис. 4 показана зона измерения пространственных координат и параметров движения БПЛА. С этой зоной жестко связаны локальная система координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$ и две вспомогательные системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$. Измерение пространственных координат БПЛА, координат центра матрицы видеокамеры, координат оптического центра объектива и фокуса видеокамеры, а также ориентация видеокамеры в пространстве задаются относительно локальной $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$ системы координат.

Плоскость матрицы видеокамеры параллельна плоскости $X_{\text{л}}O_{\text{л}}Y_{\text{л}}$, а линия $O_{\text{ц}}O_1$ перпендикулярна плоскости $X_{\text{л}}O_{\text{л}}Y_{\text{л}}$ локальной системы координат. Все объекты, находящиеся в поле зрения видеокамеры отображаются на ее матрице. Положение этих объектов на матрице определяется в пиксельной ($O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}$) и метрической ($O_{\text{ц}}X_{\text{М}}Y_{\text{М}}$) системах координат матрицы. Кроме того, для определения пространственной ориентации плоскости пеленгования используется система координат цели ($O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}Z_{\text{ц}}$). Оси этой системы координат параллельны осям пиксельной и метрической систем координат матрицы видеокамеры.

В пиксельной системе координат положение объекта определяется в пикселях матрицы, в метрической системе и системе координат цели положение объекта определяется в долях метра.

На рис. 4, в качестве примера, показано положение БПЛА в контролируемой области пространства и его отображение на матрице видеокамеры.

Характерная точка БПЛА (например, температурно-контрастный или цветоконтрастный маркер) на матрице видеокамеры имеет координаты цели (БПЛА) ($x_{\text{ц}}^{\text{бла}}; y_{\text{ц}}^{\text{бла}}$). На рис. 4 также показан вектор путевой скорости БПЛА (\vec{W}).

Положение БПЛА в пространстве и отображение его характерной точки на матрице видеокамеры находятся в одной плоскости. Эта плоскость на рис. 4 выделена заливкой серого цвета. Собственно, эта плоскость является плоскостью пеленгования БПЛА.

Азимутальное положение этой плоскости в пространстве однозначно определяется углом $\beta_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}$, заключенным между осью $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}$ и отрезком $O_{\text{ц}}\vec{P}$, соединяющим центр системы координат цели и точку, отображающую БПЛА на матрице видеокамеры.

Плоскость пеленгования однозначно задается в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$ через координаты оптического центра видеокамеры, принадлежащей этой плоскости, и вектор нормали к этой плоскости \vec{n} . Вектор нормали \vec{n} показан на рис. 4 в плоскости $X_{\text{л}}O_{\text{л}}Y_{\text{л}}$, а его отображение в плоскости матрицы видеокамеры в системе координат цели $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}$.

Для нахождения направления вектора нормали \vec{n} к плоскости пеленгования алгоритмом пеленгования предусматривается предварительное нахождение направления $\beta_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}$ вектора цели $\vec{O}_{\text{ц}}\vec{P}$ в системе координат цели в плоскости матрицы.

Вектор цели $\vec{O}_{\text{ц}}\vec{P}$ принадлежит одновременно двум плоскостям: плоскости матрицы видеокамеры и плоскости пеленгования.

Направление этого вектора в плоскости матрицы в системе координат цели определяется углом, отсчитываемым от положительного направления оси $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}$ против часовой стрелки в диапазоне от 0 до 2π .

Угол $\beta_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}$ в системе координат матрицы $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}$ может быть рассчитан через метрические координаты характерной точки БПЛА ($x_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}; y_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}$) по формуле

$$\beta_{\text{ц}_i}^{\text{бла}} = 0,5 \left(\frac{\pm y_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}}{|y_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}|} + 1 \right) \arccos \left(\frac{\pm x_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}}{\sqrt{(x_{\text{ц}_i}^{\text{бла}})^2 + (y_{\text{ц}_i}^{\text{бла}})^2}} \right) - 0,5 \left(\frac{\pm y_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}}{|y_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}|} - 1 \right) \left(\pi + \arccos \left(\frac{-(\pm x_{\text{ц}_i}^{\text{бла}})}{\sqrt{(x_{\text{ц}_i}^{\text{бла}})^2 + (y_{\text{ц}_i}^{\text{бла}})^2}} \right) \right), \quad (1)$$

где $x_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}, y_{\text{ц}_i}^{\text{бла}}$ – метрические координаты характерной точки БПЛА на матрице видеокамеры.

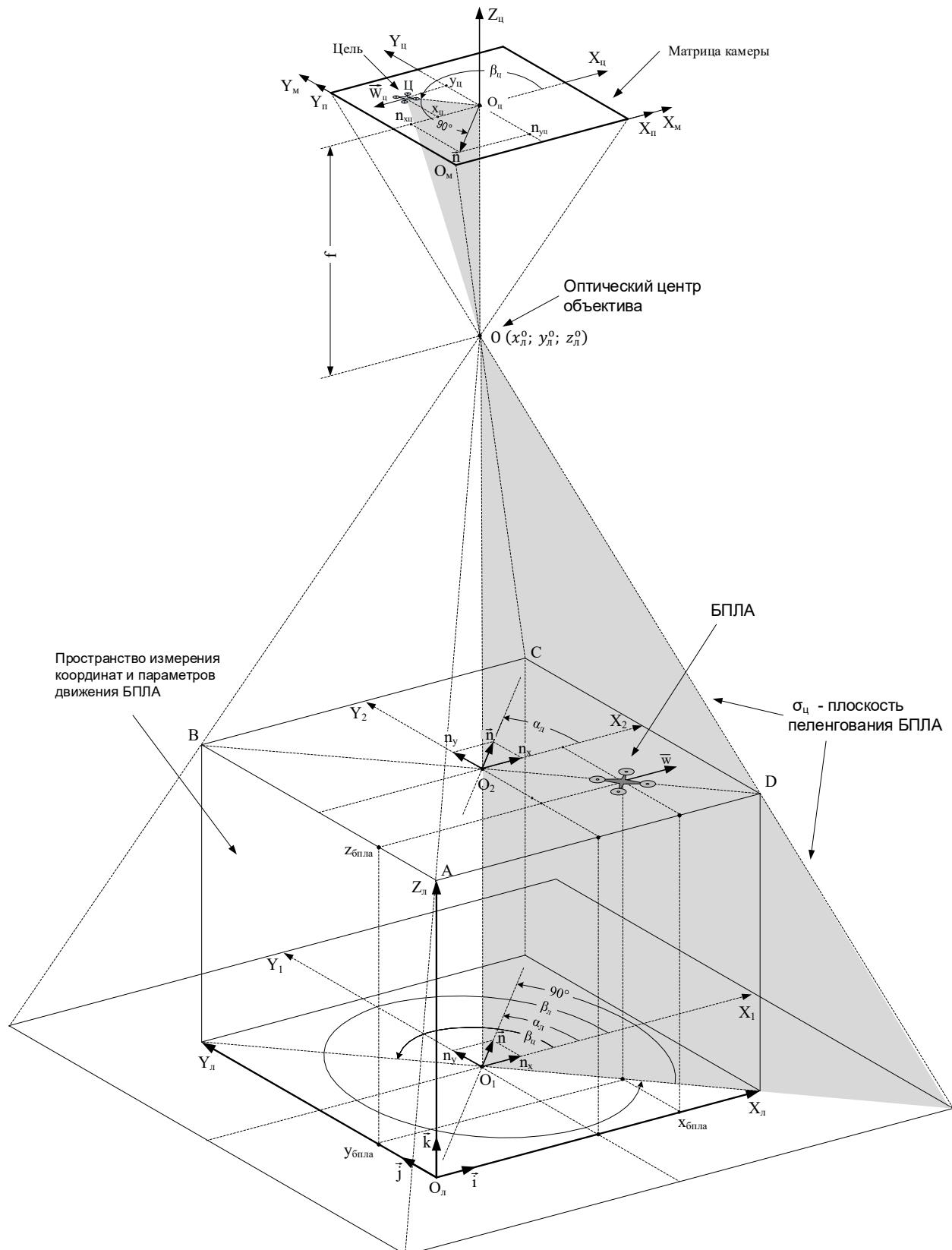


Рис. 4. Графическая модель и алгоритм определения параметров плоскости пеленгования БПЛА относительно точки стационарного размещения видеокамеры

Формула (1) является комбинацией двух формул скалярного произведения векторов в координатной форме [3].

По известному углу $\beta_{\text{н}_i}^{\text{бла}}$ определяется направление отображения вектора нормали \vec{n} в плоскости матрицы по формуле

$$\alpha_{\text{н}_i}^{\text{бла}} = \beta_{\text{н}_i}^{\text{бла}} + \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{н}_i}^{\text{бла}}$ – направление вектора нормали к плоскости пеленгования, вычисленное по метрическим координатам характерной точки БПЛА на матрице видеокамеры; $\beta_{\text{н}_i}^{\text{бла}}$ – направление вектора цели $\overrightarrow{O_{\text{н}}\Gamma}$ в системе координат цели в плоскости матрицы.

Из анализа рис. 4 следует, что направление вектора нормали к плоскости пеленгования в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$ будет противоположным углу $\alpha_{\text{н}_i}^{\text{бла}}$ и определится формулой

$$\alpha_{\text{н}_i}^{\text{бла}} = \alpha_{\text{н}_i}^{\text{бла}} + \pi, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{н}_i}^{\text{бла}}$ – направление вектора нормали к плоскости пеленгования в локальной системе координат в плоскости $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}$; $\alpha_{\text{н}_i}^{\text{бла}}$ – направление вектора нормали к плоскости пеленгования в системе координат матрицы $O_{\text{н}}X_{\text{н}}Y_{\text{н}}$.

Из анализа рис. 4 также следует, что координаты единичного вектора нормали \vec{n} к плоскости пеленгования могут быть определены как проекции этого вектора на оси локальной системы координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$ по формулам

$$n_x = \cos \alpha_{\text{л}}, \quad n_y = \sin \alpha_{\text{л}}, \quad n_z = 0. \quad (4)$$

По известным координатам вектора нормали к плоскости пеленгования $n_0(n_x; n_y; n_z)$ и пространственным координатам оптического центра объектива видеокамеры $O(x_{\text{л}}^o; y_{\text{л}}^o; z_{\text{л}}^o)$ или координатам центра матрицы видеокамеры $O_{\text{н}}(x_{\text{н}}^{O_{\text{н}}}; y_{\text{н}}^{O_{\text{н}}}; z_{\text{н}}^{O_{\text{н}}})$ определяется уравнение плоскости пеленгования [4]:

$$n_x(x - x_{\text{л}}^o) + n_y(y - y_{\text{л}}^o) + n_z(z - z_{\text{л}}^o) = 0. \quad (5)$$

После преобразования уравнения (5) получим общее уравнение плоскости пеленгования БПЛА в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$:

$$n_x x_{\text{л}}^{\text{бла}} + n_y y_{\text{л}}^{\text{бла}} + n_z z_{\text{л}}^{\text{бла}} - (n_x x_{\text{л}}^o + n_y y_{\text{л}}^o + n_z z_{\text{л}}^o) = 0, \quad (6)$$

где $x_{\text{л}}^{\text{бла}}, y_{\text{л}}^{\text{бла}}, z_{\text{л}}^{\text{бла}}$ – искомые координаты характерной точки БПЛА в локальной системе координат; n_x, n_y, n_z – координаты вектора нормали к плоскости пеленгования; $x_{\text{л}}^o, y_{\text{л}}^o, z_{\text{л}}^o$ – координаты оптического центра объектива видеокамеры в локальной системе координат.

Вместо координат оптического центра объектива видеокамеры в уравнение (6) могут быть подставлены координаты центра матрицы ($x_{\text{л}}^{\text{цм}_i}; y_{\text{л}}^{\text{цм}_i}; z_{\text{л}}^{\text{цм}_i}$). В этом случае уравнение плоскости будет иметь вид

$$n_x x_{\text{л}}^{\text{бла}} + n_y y_{\text{л}}^{\text{бла}} + n_z z_{\text{л}}^{\text{бла}} - (n_x x_{\text{л}}^{\text{цм}_i} + n_y y_{\text{л}}^{\text{цм}_i} + n_z z_{\text{л}}^{\text{цм}_i}) = 0. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) содержат три неизвестные координаты характерной точки БПЛА в локальной системе координат: $x_{\text{л}}^{\text{бла}}, y_{\text{л}}^{\text{бла}}, z_{\text{л}}^{\text{бла}}$. Для нахождения координат БПЛА необходимо иметь систему из трех таких уравнений, определяющих три плоскости пеленгования.

Система уравнений трех плоскостей, содержащих пеленгованную характерную точку БПЛА в локальной системе координат, представлена ниже:

$$\begin{cases} n_{x_1} x_{\text{л}}^{\text{бла}} + n_{y_1} y_{\text{л}}^{\text{бла}} + n_{z_1} z_{\text{л}}^{\text{бла}} - (n_{x_1} x_{\text{л}}^{\text{цм-1}} + n_{y_1} y_{\text{л}}^{\text{цм-1}} + n_{z_1} z_{\text{л}}^{\text{цм-1}}) = 0; \\ n_{x_2} x_{\text{л}}^{\text{бла}} + n_{y_2} y_{\text{л}}^{\text{бла}} + n_{z_2} z_{\text{л}}^{\text{бла}} - (n_{x_2} x_{\text{л}}^{\text{цм-2}} + n_{y_2} y_{\text{л}}^{\text{цм-2}} + n_{z_2} z_{\text{л}}^{\text{цм-2}}) = 0; \\ n_{x_3} x_{\text{л}}^{\text{бла}} + n_{y_3} y_{\text{л}}^{\text{бла}} + n_{z_3} z_{\text{л}}^{\text{бла}} - (n_{x_3} x_{\text{л}}^{\text{цм-3}} + n_{y_3} y_{\text{л}}^{\text{цм-3}} + n_{z_3} z_{\text{л}}^{\text{цм-3}}) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $x_{\text{л}}^{\text{бла}}$, $y_{\text{л}}^{\text{бла}}$, $z_{\text{л}}^{\text{бла}}$ – координаты искомой характерной точки БПЛА в локальной системе координат; n_{x_1} , n_{y_1} , n_{z_1} – координаты вектора нормали к первой плоскости пеленгования; n_{x_2} , n_{y_2} , n_{z_2} – координаты вектора нормали ко второй плоскости пеленгования; n_{x_3} , n_{y_3} , n_{z_3} – координаты вектора нормали к третьей плоскости пеленгования; $x_{\text{л}}^{\text{цм-1}}$, $y_{\text{л}}^{\text{цм-1}}$, $z_{\text{л}}^{\text{цм-1}}$ – координаты центра матрицы первой видеокамеры; $x_{\text{л}}^{\text{цм-2}}$, $y_{\text{л}}^{\text{цм-2}}$, $z_{\text{л}}^{\text{цм-2}}$ – координаты центра матрицы второй видеокамеры; $x_{\text{л}}^{\text{цм-3}}$, $y_{\text{л}}^{\text{цм-3}}$, $z_{\text{л}}^{\text{цм-3}}$ – координаты центра матрицы третьей видеокамеры в локальной системе координат.

Алгоритм функционирования локальной системы пространственного позиционирования БПЛА

Работа алгоритма позиционирования БПЛА обеспечивается компьютерной программой, позволяющей в реальном масштабе времени производить покадровую синхронную обработку видеопотока, получаемого с трех видеокамер.

Функциональная схема алгоритма функционирования локальной системы пространственного позиционирования БПЛА представлена на рис. 5.

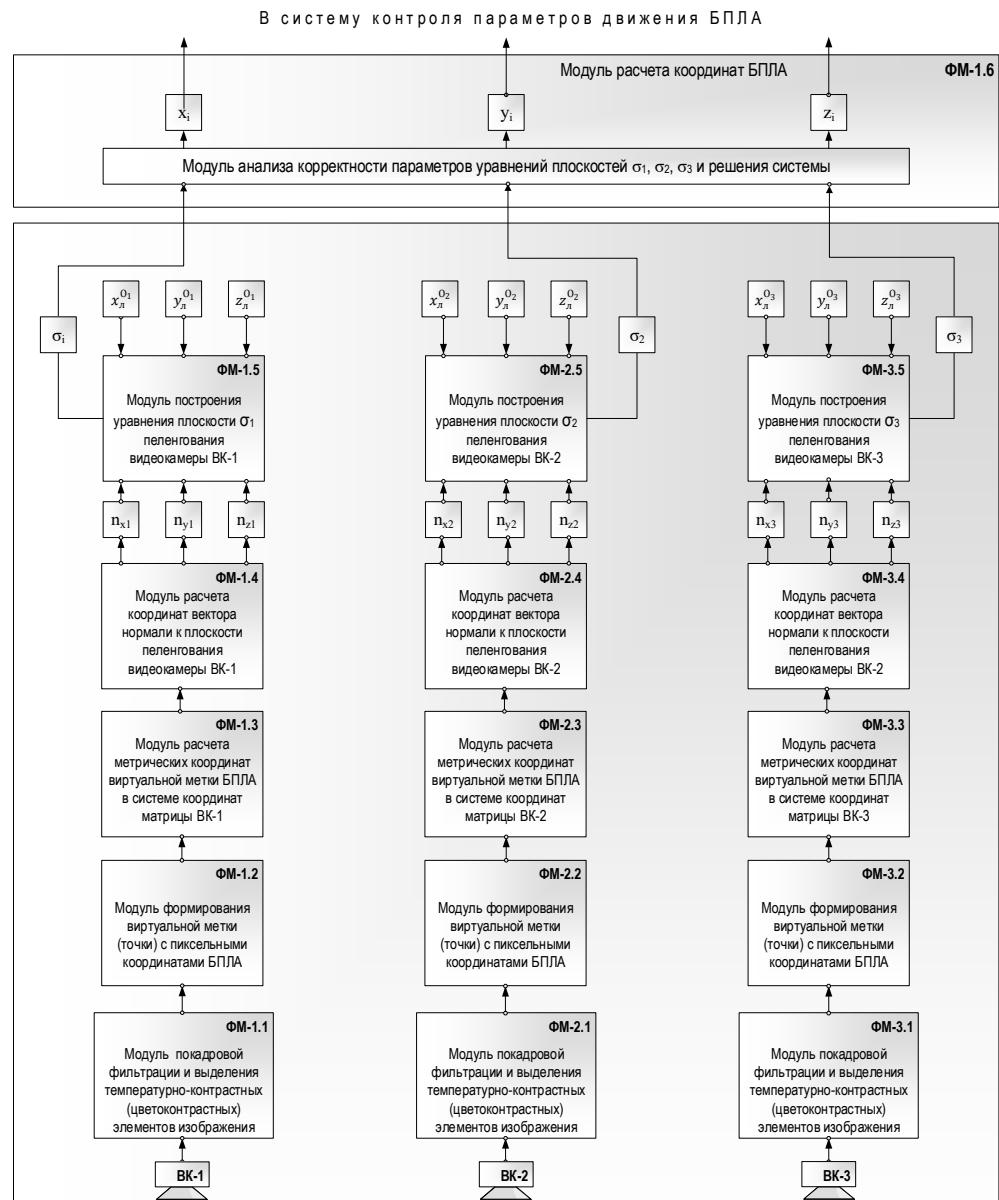


Рис. 5. Функциональная схема алгоритма функционирования локальной системы пространственного позиционирования БПЛА

Вideoизображение в реальном масштабе времени формируется видеокамерами ВК-1, ВК-2 и ВК-3. С помощью специального программного алгоритма обработки видеоЗображения осуществляется покадровая фильтрация и выделение температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов изображения БПЛА (функциональные модули ФМ-1.1, ФМ-2.1 и ФМ-3.1).

С помощью специального алгоритма в каждом кадре видеопотока формируется виртуальная точка с пиксельными координатами, соответствующими фактическому проецированию характерной точки БПЛА на матрицу видеокамеры (функциональные модули ФМ-1.2, ФМ-2.2 и ФМ-3.2).

В свою очередь, пиксельные координаты сформированной характерной точки БПЛА на матрицах видеокамер преобразуются функциональными модулями ФМ-1.3, ФМ-2.3 и ФМ-3.3 в метрические координаты, выраженные в долях метра (в микрометрах).

По текущим значениям метрических координат БПЛА в системе координат матрицы рассчитываются координаты единичного вектора нормали к каждой из трех плоскостей пеленгования (функциональные модули ФМ-1.4, ФМ-2.4 и ФМ-3.4).

Далее в соответствии с алгоритмом по текущим значениям координат векторов нормалей и значениям координат фокусов видеокамер рассчитываются параметры уравнений трех плоскостей пеленгования σ_1 , σ_2 и σ_3 .

После процедуры проверки корректности параметров уравнений плоскостей производится циклическое решение системы уравнений. В результате процедуры циклического решения системы уравнений трех плоскостей формируется массив текущих значений координат БПЛА $(x_{\text{л}}^{\text{бла}}, y_{\text{л}}^{\text{бла}}, z_{\text{л}}^{\text{бла}})$ в локальной системе координат с дискретностью равной частоте кадров видеокамеры.

Аналитическое моделирование работы системы локального позиционирования

С целью проверки корректности работы алгоритма в рамках исследования проводилось аналитическое и практическое моделирование работы системы локального позиционирования.

С целью аналитического моделирования системы были заданы следующие исходные параметры:

- размер зоны контроля координат: длина: $l_x = 10$ м, ширина $l_y = 5$ м, высота $l_z = 5$ м;
- фактические локальные координаты БПЛА: $x_{\text{л}}^{\text{бла}} = 7,5$ м; $y_{\text{л}}^{\text{бла}} = 1,25$ м; $z_{\text{л}}^{\text{бла}} = 4$ м;
- размер пикселя фотоматрицы [5]: $0,006 \times 0,006$ мм;
- размер матрицы [5]: 3×4 мм;
- фокусное расстояние объектива камеры [5]: $f = 3,6$ мм;
- координаты оптического центра объектива первой видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{O_1} = 5$ м; $y_{\text{л}}^{O_1} = 2,5$ м; $z_{\text{л}}^{O_1} = 4,9964$ м;
- координаты оптического центра объектива второй видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{O_2} = 7,5$ м; $y_{\text{л}}^{O_2} = 3,75$ м; $z_{\text{л}}^{O_2} = 4,9964$ м;
- координаты оптического центра объектива третьей видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{O_3} = 0,0036$ м; $x_{\text{л}}^{O_3} = 2,5$ м; $x_{\text{л}}^{O_3} = 3,5$ м;
- координаты центра матрицы первой видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{\text{цм-1}} = 5$ м; $y_{\text{л}}^{\text{цм-1}} = 2,5$ м; $z_{\text{л}}^{\text{цм-1}} = 5$ м;
- координаты центра матрицы второй видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{\text{цм-2}} = 7,5$ м; $y_{\text{л}}^{\text{цм-2}} = 3,75$ м; $z_{\text{л}}^{\text{цм-2}} = 5$ м;
- координаты центра матрицы третьей видеокамеры в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $x_{\text{л}}^{\text{цм-3}} = 0$ м; $y_{\text{л}}^{\text{цм-3}} = 2,5$ м; $z_{\text{л}}^{\text{цм-3}} = 3,5$ м.

Переход от координат $(x_{\text{л}}; y_{\text{л}}; z_{\text{л}})$ локальной системы координат к координатам $(x_1; y_1; z_1)$ вспомогательной системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ осуществлялся по формулам:

$$x_1 = x_{\text{л}} - a_x; \quad y_1 = y_{\text{л}} - a_y; \quad z_1 = z_{\text{л}} - a_z, \quad (9)$$

где $x_{\text{л}}; y_{\text{л}}; z_{\text{л}}$ – координаты точки в локальной системе координат; x_1, y_1, z_1 – координаты точки во вспомогательной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$; a_x, a_y, a_z – линейные смещения начала вспомогательной системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ относительно начала координат локальной системы $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$.

Переход от координат $(x_{\text{л}}; y_{\text{л}}; z_{\text{л}})$ локальной системы координат к координатам $(x_2; y_2; z_2)$ вспомогательной системы координат $O_2X_2Y_2Z_2$ осуществляется по формулам:

$$x_2 = x_{\text{л}} - b_x; \quad y_2 = y_{\text{л}} - b_y; \quad z_2 = z_{\text{л}} - b_z, \quad (10)$$

где $x_{\text{л}}; y_{\text{л}}; z_{\text{л}}$ – координаты точки в локальной системе координат; x_2, y_2, z_2 – координаты точки во вспомогательной системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$; b_x, b_y, b_z – линейные смещения начала вспомогательной системы координат $O_2X_2Y_2Z_2$ относительно начала координат локальной системы $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$.

Моделирование фактических метрических координат $(x_{\text{ц}}^{\text{бла}}; y_{\text{ц}}^{\text{бла}}; z_{\text{ц}}^{\text{бла}})$ отметки от БПЛА в системе координат цели $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}$ в плоскости матрицы видеокамеры № 1 как функций фактических локальных координат БПЛА $(x_{\text{л}}^{\text{бла}}; y_{\text{л}}^{\text{бла}}; z_{\text{л}}^{\text{бла}})$ производилось по формулам:

– видеокамера № 1:

координата $x_{\text{ц}}^{\text{бла}}$:

$$x_{\text{ц}}^{\text{бла}} = -\frac{f_1(x_{\text{л}}^{\text{бла}} - x_{\text{л}}^{\text{вк-1}})}{(l_z - z_{\text{л}}^{\text{бла}} - f_1)}; \quad (11)$$

координата $y_{\text{ц}}^{\text{бла}}$:

$$y_{\text{ц}}^{\text{бла}} = -\frac{f_1(y_{\text{л}}^{\text{бла}} - y_{\text{л}}^{\text{вк-1}})}{(l_z - z_{\text{л}}^{\text{бла}} - f_1)}; \quad (12)$$

координата $z_{\text{ц}}^{\text{бла}}$:

$$z_{\text{ц}}^{\text{бла}} = 0, \quad (13)$$

где $x_{\text{ц}}^{\text{бла}}, y_{\text{ц}}^{\text{бла}}, z_{\text{ц}}^{\text{бла}}$ – координаты БПЛА в системе координат цели $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}$ матрицы видеокамеры № 1; $x_{\text{л}}^{\text{бла}}, y_{\text{л}}^{\text{бла}}, z_{\text{л}}^{\text{бла}}$ – координаты БПЛА в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$; f_1 – фокусное расстояние видеокамеры № 1.

Моделирование фактических метрических координат $(x_{\text{ц}}^{\text{бла}}; y_{\text{ц}}^{\text{бла}}; z_{\text{ц}}^{\text{бла}})$ отметки от БПЛА в системе координат цели $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}$ в плоскости матрицы видеокамеры № 2 как функций фактических локальных координат БПЛА $(x_{\text{л}}^{\text{бла}}; y_{\text{л}}^{\text{бла}}; z_{\text{л}}^{\text{бла}})$ производилось по формулам:

– видеокамера № 2:

координата $x_{\text{ц}}^{\text{бла}}$:

$$x_{\text{ц}}^{\text{бла}} = -\frac{f_2(x_{\text{л}}^{\text{бла}} - x_{\text{л}}^{\text{вк-2}})}{(l_z - z_{\text{л}}^{\text{бла}} - f_2)}; \quad (14)$$

координата $y_{\text{ц}}^{\text{бла}}$:

$$y_{\text{ц}}^{\text{бла}} = -\frac{f_2(y_{\text{л}}^{\text{бла}} - y_{\text{л}}^{\text{вк-2}})}{(l_z - z_{\text{л}}^{\text{бла}} - f_2)}; \quad (15)$$

координата $z_{\text{ц}}^{\text{бла}}$:

$$z_{\text{ц}}^{\text{бла}} = 0, \quad (16)$$

где $x_{\text{ц}}^{\text{бла}}, y_{\text{ц}}^{\text{бла}}, z_{\text{ц}}^{\text{бла}}$ – координаты БПЛА в системе координат цели $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}$ матрицы видеокамеры № 2; $x_{\text{л}}^{\text{бла}}, y_{\text{л}}^{\text{бла}}, z_{\text{л}}^{\text{бла}}$ – координаты БПЛА в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$; f_2 – фокусное расстояние видеокамеры № 2.

Моделирование фактических метрических координат ($x_{\text{п}}^{\text{бла}}$; $y_{\text{п}}^{\text{бла}}$; $z_{\text{п}}^{\text{бла}}$) отметки от БПЛА в системе координат цели $O_{\text{п}}X_{\text{п}}Y_{\text{п}}$ в плоскости матрицы видеокамеры № 3 как функций фактических локальных координат БПЛА ($x_{\text{л}}^{\text{бла}}$; $y_{\text{л}}^{\text{бла}}$; $z_{\text{л}}^{\text{бла}}$) производилось по формулам:

– видеокамера № 3:

координата $x_{\text{п}}^{\text{бла}}$:

$$x_{\text{п}}^{\text{бла}} = 0; \quad (17)$$

координата $y_{\text{п}}^{\text{бла}}$:

$$y_{\text{п}}^{\text{бла}} = -\frac{f_3(y_{\text{л}}^{\text{бла}} - y_{\text{л}}^{\text{вк-3}})}{x_{\text{л}}^{\text{бла}} - f_3}; \quad (18)$$

координата $z_{\text{п}}^{\text{бла}}$:

$$z_{\text{п}}^{\text{бла}} = -\frac{f_3(z_{\text{л}}^{\text{бла}} - z_{\text{л}}^{\text{вк-3}})}{x_{\text{л}}^{\text{бла}} - f_3}, \quad (19)$$

где $x_{\text{п}}^{\text{бла}}$, $y_{\text{п}}^{\text{бла}}$, $z_{\text{п}}^{\text{бла}}$ – координаты БПЛА в системе координат цели $O_{\text{п}}X_{\text{п}}Y_{\text{п}}$ матрицы видеокамеры № 3; $x_{\text{л}}^{\text{бла}}$, $y_{\text{л}}^{\text{бла}}$, $z_{\text{л}}^{\text{бла}}$ – координаты БПЛА в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$; f_3 – фокусное расстояние видеокамеры № 3.

Моделирование текущих значений пеленгов БПЛА и угловых положений векторов нормалей к плоскостям пеленгования осуществлялось по формулам (1)–(3).

Моделирование текущих координат векторов нормалей \vec{n}_i к плоскостям пеленгования осуществлялось через расчет текущих значений проекций этих векторов на оси локальной системы координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$ по формулам:

– для видеокамеры № 1:

$$n_{x_1} = \cos(\alpha_{\text{лвк1}}^{\text{бла}}); n_{y_1} = \sin(\alpha_{\text{лвк1}}^{\text{бла}}); n_{z_1} = 0; \quad (20)$$

– для видеокамеры № 2:

$$n_{x_2} = \cos(\alpha_{\text{лвк2}}^{\text{бла}}); n_{y_2} = \sin(\alpha_{\text{лвк2}}^{\text{бла}}); n_{z_2} = 0; \quad (21)$$

– для видеокамеры № 3:

$$n_{x_3} = 0; n_{y_3} = \cos(\alpha_{\text{лвк3}}^{\text{бла}}); n_{z_3} = \sin(\alpha_{\text{лвк3}}^{\text{бла}}). \quad (22)$$

Моделирование текущих пространственных положений плоскостей пеленгования осуществлялось по формуле (7).

В результате моделирования получена система трех уравнений с тремя искомыми координатами БПЛА. Решение системы уравнений трех плоскостей осуществлялось методом Крамера [4]. Результаты аналитического моделирования процесса пеленгования БПЛА тремя видеокамерами представлены в табл. 1.

По вычисленным координатам векторов нормалей к плоскостям пеленгования БПЛА и координатам центров матриц трех видеокамер в соответствии с алгоритмом составлена система уравнений трех плоскостей:

$$\begin{cases} 0,447 \cdot x_{\text{л}}^{\text{бла}} + 0,894 \cdot y_{\text{л}}^{\text{бла}} + 0 \cdot z_{\text{л}}^{\text{бла}} - 4,472 = 0; \\ 1 \cdot x_{\text{л}}^{\text{бла}} + 0 \cdot y_{\text{л}}^{\text{бла}} + 0 \cdot z_{\text{л}}^{\text{бла}} - 7,5 = 0; \\ 0 \cdot x_{\text{л}}^{\text{бла}} - 0,37 \cdot y_{\text{л}}^{\text{бла}} - 0,93 \cdot z_{\text{л}}^{\text{бла}} + 4,18 = 0. \end{cases} \quad (23)$$

Решение системы уравнений (23) однозначно определяет точку с координатами БПЛА:

$$x_{\text{л}}^{\text{бла}} = 7,5 \text{ м}, y_{\text{л}}^{\text{бла}} = 1,25 \text{ м}, z_{\text{л}}^{\text{бла}} = 4 \text{ м}. \quad (24)$$

Габлица 1

Результаты аналитического моделирования процесса пеленгования БПЛА тремя видеокамерами

Исходные данные										Расчетные данные								
Номер видеокамеры	БПЛА	Фактические координаты в метрах в локальной системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$	Размер зоны контроля координат (м)	Фокусное расстояние (м)	Координаты БПЛА в метрах на матрице видеокамеры в системе координат цели $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}Z_{\text{ц}}$				Угол пеленга цели в $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}Z_{\text{ц}}$ (радиан)	Направление нормали к плоскости пеленгования в $O_{\text{ц}}X_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}Z_{\text{ц}}$ (радиан)			Координаты вектора нормали к плоскости пеленгования					
					$X_{\text{л}}^{\text{бла}}$	$Y_{\text{л}}^{\text{бла}}$	$Z_{\text{л}}^{\text{бла}}$	$X_{\text{ц}}^{\text{им}}$	$Y_{\text{ц}}^{\text{им}}$	$Z_{\text{ц}}^{\text{им}}$	$x_{\text{ц}}^{\text{бла}}$	$y_{\text{ц}}^{\text{бла}}$	$z_{\text{ц}}^{\text{бла}}$	$\alpha_{\text{ц}}^{\text{бла}}$	$\beta_{\text{ц}}^{\text{бла}}$	n_x	n_y	n_z
1	7,5	1,25	4	5	2,5	5	10	5	5	0,0036	-0,009033	0,004516	0,000000	2,678	1,107	0,447214	0,894427	0,000000
2	7,5	1,25	4	7,5	3,75	5	10	5	5	0,0036	0,000000	0,009033	0,000000	1,571	0,000	1,000000	0,000000	0,000000
3	7,5	1,25	4	0	2,5	3,5	10	5	5	0,0036	0,000000	0,000600	-0,000240	5,903	4,332	0,000000	-0,371391	-0,928477

Таким образом, аналитическое моделирование процесса пеленгования БПЛА тремя видеокамерами подтверждает работоспособность и корректность предложенного алгоритма определения текущих локальных координат БПЛА.

В настоящее время авторским коллективом проводятся исследования по практической реализации алгоритма с целью его экспериментальной проверки в тренажерной системе операторов БПЛА [6].

Заключение

С целью обеспечения тренажерной подготовки операторов беспилотных авиационных систем необходимо непрерывное определение точных фактических координат БПЛА. Это является необходимым условием как выполнения полетного задания, так и точной оценки действий оператора БАС. Для определения координат БПЛА в процессе тренажерной подготовки требуется относительно недорогая, автономная и достаточно точная система пространственного позиционирования.

В настоящее время разработано и используется для этих целей несколько таких автономных систем. В частности, к таким системам можно отнести ультразвуковую и инфракрасную локальные системы позиционирования. Эти системы решают задачу локального позиционирования БПЛА, но имеют ряд ограничений их применения в закрытом пространстве.

Таким образом, для целей тренажерной подготовки операторов БАС в закрытых помещениях существует необходимость разработки новых автономных локальных систем позиционирования БПЛА с высокими точностными характеристиками.

Предложенная концептуальная модель локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции является альтернативой существующим системам подобного рода.

Аналитическое моделирование процесса пеленгования БПЛА тремя видеокамерами подтверждает корректность предложенной математической модели и алгоритмов функционирования локальной системы пространственного позиционирования беспилотного летательного аппарата на основе пеленгования температурно-контрастных (цветоконтрастных) элементов его конструкции.

Список литературы

- Герасимов С. И., Костин В. И. Калибровка не метрических цифровых фото- и видеокамер для фотограмметрических измерений : учеб. пособие для студентов вузов. Саратов : СарФТИ, 2015. 71 с. URL: <https://golnk.ru/D8xKk> (дата обращения: 02.11.2024).
- Рацен С. С., Симаков А. В., Симакова Т. В. [и др.]. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территории : учеб. пособие. Тюмень : ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2023. 149 с. URL: <https://www.gausz.ru/nauka/setevye-izdaniya/2023/racen.pdf> (дата обращения: 02.11.2024).
- Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М. : Изд-во АСТ, 2019. 703 с.
- Клошин В. Л. Высшая математика для экономистов : учеб. пособие. М. : ИНФРА-М, 2009. 448 с.
- Рыжова В. А., Ярышев С. Н., Коротаев В. В. Интеллектуальные системы видеонаблюдения : учеб. пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2021. 107 с.
- Власов А. И., Карпунин А. А., Курышев Р. Э. Визуальное моделирование smart-технологий проектного управления // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 64–70.

References

- Gerasimov S.I., Kostin V.I. *Kalibrovka ne metricheskikh tsifrovyykh foto- i videokamer dlya fotogrammetricheskikh izmereniy: ucheb. posobie dlya studentov vuzov* = Calibration of non-metric digital photo and video cameras for photogrammetric measurements : a textbook for university students. Saratov: SarFTI, 2015:71. (In Russ.). Available at: <https://golnk.ru/D8xKk> (accessed 02.11.2024).
- Ratsen S.S., Simakov A.V., Simakova T.V. et al. *Fotogrammetriya i distantsionnoye zondirovaniye territorii: ucheb. posobie* = Photogrammetry and remote sensing of the territory : a textbook. Tyumen: FGBOU VO GAU Severnogo Zaural'ya, 2023:149. (In Russ.). Available at: <https://www.gausz.ru/nauka/setevye-izdaniya/2023/racen.pdf> (accessed 02.11.2024).
- Vygodskiy M.Ya. *Spravochnik po vysshay matematike* = Handbook of Higher Mathematics. Moscow: Izd-vo AST, 2019:703. (In Russ.)
- Klyushin V.L. *Vysshaya matematika dlya ekonomistov: ucheb. posobiye* = Higher mathematics for economists : a textbook. Moscow: INFRA-M, 2009:448. (In Russ.)

5. Ryzhova V.A., Yaryshev S.N., Korotayev V.V. *Intellektual'nyye sistemy videonablyudeniya: ucheb. posobiye = Intelligent video surveillance systems : a textbook.* Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2021:107. (In Russ.)
6. Vlasov A.I., Karpunin A.A., Kuryshev R.E. Visual modeling of smart project management technologies. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2020;1:64–70. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Алексеевич Коваль

инженер кафедры информационных образовательных технологий и систем,
Луганский государственный педагогический университет
(Россия, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)
E-mail: navigatorsystem@yandex.ru

Anatoliy A. Koval

Engineer of the sub-department of information educational technologies and systems,
Lugansk State Pedagogical University
(2 Oboronnaya street, Lugansk, Russia)

Денис Алексеевич Капустин

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных образовательных технологий и систем,
Луганский государственный педагогический университет
(Россия, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)
E-mail: kap-kapchik@mail.ru

Denis A. Kapustin

Doctor of technical sciences, associate professor, head of the sub-department of information educational technologies and systems,
Lugansk State Pedagogical University
(2 Oboronnaya street, Lugansk, Russia)

Геннадий Викторович Короп

кандидат технических наук, доцент, ведущий системный аналитик отдела развития и разработки информационных систем службы информационных технологий, ООО «Авиакомпания Волга-Днепр»
(Россия, г. Москва, Международное шоссе, 28Б, стр. 3)
E-mail: korop_g@mail.ru

Gennady V. Korop

Candidate of technical sciences, associate professor, leading systems analyst of the department of development and information systems of the information technology service, LLC "Volga-Dnepr Airlines"
(build. 3, 28B Mezhdunarodnoye highway, Moscow, Russia)

Светлана Владимировна Онопченко

кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры информационных образовательных технологий и систем, Луганский государственный педагогический университет
(Россия, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)
E-mail: osv260176@rambler.ru

Svetlana V. Onopchenko

Candidate of pedagogical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of information educational technologies and systems, Lugansk State Pedagogical University
(2 Oboronnaya street, Lugansk, Russia)

Роман Николаевич Сентяй

старший преподаватель кафедры информационных образовательных технологий и систем, Луганский государственный педагогический университет
(Россия, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)
E-mail: sentyayroman@yandex.ru

Roman N. Sentyay

Senior lecturer of the sub-department of information educational technologies and systems, Lugansk State Pedagogical University
(2 Oboronnaya street, Lugansk, Russia)

Вячеслав Владимирович Швыров

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры информационных образовательных
технологий и систем,
Луганский государственный
педагогический университет
(Россия, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)
E-mail: slavik_asas@mail.ru

Viacheslav V. Shvyrov

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of information educational
technologies and systems,
Lugansk State Pedagogical University
(2 Oboronnaya street, Lugansk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 14.05.2025

Принята к публикации/Accepted 04.06.2025

ЭКСПЕРТИЗА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ОБРАЩЕНИЯ С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

А. С. Григорьев¹, Н. Н. Сафонова², И. А. Тутнов³

^{1,3} Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Ассоциация организаций строительного комплекса атомной отрасли, Москва, Россия

¹ Grigoriev_AS@nrcki.ru, ² safronova_nn@accni.ru, ³ Tutnov_IA@nrcki.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Рассмотрены возможные пути решения актуальной задачи экспертизы и диагностического контроля качества специфической продукции оригинальных производств по утилизации демонтированных конструктивных элементов атомных станций в период их вывода из эксплуатации. *Материалы и методы.* Приведен метод расчета вероятностей проявления ошибок в процессе проверки качества готовой продукции серийного производства в сфере утилизации и переработки конструкционных материалов энергоблоков с ядерными реакторами с целью повторного применения этой продукции, материалов и изделий по новому назначению. Предложен метод экспертизы качества такой продукции, оценен результат – уменьшение вероятности пропуска дефектной продукции при контроле нескольких параметров, определяющих физико-техническую ценность замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций. Метод открывает возможность: оптимально, по критериям рационального природопользования и экологической приемлемости, экономической целесообразности, выбрать и оценить эффективность различных сочетаний инструментальных средств неразрушающего диагностического контроля и экспертизы качества готовой продукции в целом; по результатам оценки качества готовой продукции определить технологическую карту межоперационного и выходного контроля для производства по переработке демонтированных конструктивных компонентов атомных электростанций на этапе ликвидации их негативного ядерного наследия. *Результаты и выводы.* Представлены и обоснованы основные научные положения и принципы, на базе которых строится метод системного анализа и экспертизы качества продукции в формате замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами ядерных энергетических установок.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, вывод из эксплуатации, безопасность, метод контроля, надежность производственного контроля качества продукции

Финансирование: статья подготовлена при выполнении государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в рамках выполнения договора № 210/494-24.

Для цитирования: Григорьев А. С., Сафонова Н. Н., Тутнов И. А. Экспертиза качества продукции замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 70–81.
doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-7

QUALITY PRODUCTS EXAMINATION AT CLOSED-CYCLE INDUSTRIES NUCLEAR POWER PLANT STRUCTURAL MATERIALS

A.S. Grigoriev¹, N.N. Safronova², I.A. Tutnov³

^{1,3} National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

² Association of Nuclear Industry Construction Organizations, Moscow, Russia

¹ Grigoriev_AS@nrcki.ru, ² safronova_nn@accni.ru, ³ Tutnov_IA@nrcki.ru

Abstract. Background. The article considers the way to solve the urgent problem of expertise and quality testing of specific products of original production facilities for the utilization of dismantled structural elements of nuclear power plants during their decommissioning. *Materials and methods.* The methodology for calculating the probabilities of errors in the process of checking the quality of finished products of mass production in the field of utilization and processing of structural materials of power units with nuclear reactors, in order to reuse these products, materials and products for a new purpose, is presented. A method of examining the quality of such products is proposed, and the result is estimated – reducing the likelihood of defective products being missed when inspecting several parameters that

determine the physic technological value of a closed cycle of handling structural materials of nuclear power plants. The method opens up the possibility to optimally select and evaluate the effectiveness of various combinations of tools for non-destructive examination the finished products quality of in general, according to the criteria of rational use of natural resources and environmental acceptability, economic feasibility; Based on the results of the evaluation of the quality of finished products, determine the technological map of output examination for the processing of dismantled structural components of nuclear power plants at the stage of eliminating their negative nuclear legacy. *Results and conclusions.* The presentation and substantiation of the main scientific provisions and principles on the basis of which a system analysis of product quality is based in a closed-loop format for handling structural materials of nuclear power plants.

Keywords: nuclear power plant, decommissioning, safety, control method, reliability of production quality control

Financing: the article was prepared while fulfilling the state assignment of the NRC "Kurchatov Institute" in the framework of the implementation of contract No. 210/494-24.

For citation: Grigoriev A.S., Safronova N.N., Tutnov I.A. Quality products examination at closed-cycle industries nuclear power plant structural materials. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):70–81. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-7

Введение

К настоящему времени при формировании технических решений в сфере деятельности по массовому выводу из эксплуатации АЭС предложено ориентироваться на процессы [1, 2], относящиеся к развитию и созданию замкнутого цикла переработки металлических и иных отходов атомной отрасли, обеспечивающего возврат в атомную индустрию вторичных продуктов переработки конструкционных материалов и изделий ядерных энергетических установок (ЯЭУ). До 2040 г. в мире предполагается вывести из эксплуатации более 150 ядерных реакторов. На сегодня в России уже остановлено 10 энергоблоков АЭС, они находятся в состоянии ликвидации негативных последствий их промышленного функционирования. Планируется, что к 2040 г. будут окончательно остановлены более 25 энергоблоков с ядерными энергетическими реакторами, выведены из эксплуатации многие исследовательские ЯЭУ и другие объекты использования атомной энергии, что приведет к существенным затратам для смягчения вредных последствий использования атомной энергии. По экспертным оценкам многих специалистов, общие затраты на вывод из эксплуатации одного энергоблока АЭС в текущих ценах оцениваются в \$ 2–3 млрд [1, 3]. Поэтому актуальной научной проблеме по снижению общих затрат и объема требуемых ресурсов для ликвидации негативного ядерного наследия ЯЭУ, с одновременным повышением эффективности, безопасности и экологической приемлемости деятельности по массовому выводу из эксплуатации АЭС, в текущий период уделяется особое внимание специалистов и экспертов разного междисциплинарного профиля.

По экспертным оценкам специалистов при выводе из эксплуатации одного энергоблока с ядерными реакторами типа ВВЭР [4] первых поколений образуется около 50 000 т демонтированных металлоконструкций и металлических отходов. Из общего количества продуктов демонтажа энергоблока, предназначенных для утилизации, только небольшая часть этой металлической продукции и отходов – около 1,5 % демонтированного оборудования и металлоконструкций, включая крупные фрагменты корпусов ядерного реактора, циркуляционных насосов теплоносителя первого контура, парогенератора и их внутренних устройств, а также элементы главных циркуляционных трубопроводов имеют опасные радиоактивные загрязнения. Основная же масса демонтированных фрагментов конструктивных компонентов ЯЭУ и образующихся различных металлических отходов, инструментальных средств и приспособлений, применяемых для ликвидации АЭС, будет иметь уровень фактической активности, относящийся к радиоактивным отходам категории: низко активные и очень низко активные [5]. Накопленный опыт проведения масштабных работ по выводу из эксплуатации АЭС [2, 6–8], дезактивации демонтированных фрагментов металлических конструкций и отходов свидетельствует, что следует ожидать – до 99 % объема демонтированного металла может быть выведено из-под радиационного контроля и впоследствии переработано в новую полезную продукцию. Затем эта металлическая продукция может быть предложена к повторному использованию во многих сферах хозяйственной деятельности страны по новому назначению. Это обстоятельство определяет существенную значимость и физико-технологическую ценность замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций и важность формирования адекватных технических решений по контролю качества и надежности в сфере специализированных производств по обращению с металлическими отходами демонтированных энергоблоков АЭС, а также утилизации, переработки этих отходов в состояние, пригодное для повторного использования конверсионного металла ЯЭУ по новому назначению.

Научный поиск решения проблемы эффективного вывода из эксплуатации ЯЭУ, которая является одной из основных для мировой атомной энергетики [2] на ближайшие годы, определяет актуальность темы данной публикации в аспектах разработки новых методов и средств для выполнения экспертизы качества продукции замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций, а также системного проектирования, анализа приемлемости технических решений в сфере надежности, безопасности и защиты окружающей среды при реализации замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций на индустриальной основе.

Постановка задачи

Пока отсутствуют универсальные решения инженерных задач массового вывода АЭС из эксплуатации, что требует разработки множества адекватных реальным обстоятельствам технических решений, их классификационного объединения и применения для эффективного планирования и управления технологическими процессами ликвидации ядерного наследия атомной энергетики [1, 9]. Актуальность и цель поиска лучшего технического решения практических инженерных задач по выводу из эксплуатации АЭС и смягчения последствий негативного ядерного наследия мирного атома в ближайшем будущем определяется тем, что заключительный период жизненного цикла АЭС предполагает утилизацию, окончательное захоронение опасных радиоактивных материалов и изделий, конструктивных компонентов энергоблока и его ликвидацию в целом [5, 10, 11]. С другой стороны, вызовы современности по рациональному природопользованию, инновационной и инвестиционной эффективности, социальной приемлемости рисков в деле сохранения окружающей среды и чувствительного обращения с промышленными и иными отходами в атомной энергетике определяют вектор практической деятельности по выводу из эксплуатации АЭС в новом научном направлении – формирование технических условий для реализации замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами (ЗЦОКМ) энергоблоков АЭС. Данный цикл априори предполагает возможность многократного использования конструкционных материалов и даже изделий или деталей, отработавших свой срок эксплуатации в составе конструктивных компонентов энергоблока, но еще пригодных и безопасных для повторного применения по новому назначению в атомной энергетике и смежной с ней отраслях промышленности. Итоговым результатом ЗЦОКМ АЭС, со всей очевидностью, должно быть высокое качество и надежность конверсионной продукции.

Таким образом, важным и своевременным становится поиск путей решения задачи по организации производственного диагностического контроля показателей надежности и безопасности применения конверсионных металлических материалов ЯЭУ по новому назначению.

На этом пути в совершенствовании методологии индустриализации процессов вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС в формате ЗЦОКМ АЭС будет эффективен системный анализ технических решений по становлению системы выходного технологического контроля конверсионной продукции, метрологического обслуживания измерительных приборов, приборов контроля и автоматики, информационно-измерительных и управляющих систем, которые используются в качестве инструментальных средств для обеспечения надежности выходного контроля качества продукции предприятий по обращению и утилизации демонтированных конструктивных компонентов АЭС. Вероятностные показатели точности диагностических и тестовых измерений служебных характеристик конверсионной продукции в формате ЗЦОКМ АЭС, а также итоговая достоверность экспертизы качества этой продукции отражают правильность и точность моделей системного анализа рисков повторного использования конструкционных материалов АЭС. Поэтому выбор принципов, на основе которых строится система контроля качества и надежности, метрологического обслуживания диагностических и иных инструментальных средств промышленных производств ЗЦОКМ АЭС следует проводить, прежде всего, исходя из заданной точности моделирования процессов старения и прогнозирования физической долговечности технологических компонентов конверсионной продукции. Отсюда следует необходимость оценки достаточности и возможных ошибок при проведении выходного контроля качества конверсионной продукции с использованием фундаментальных положений системного анализа безопасности сложных динамических систем и рекомендаций, изложенных в монографии [12]. Таким образом, основой для постановки задачи о разработке метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС в нашем случае будут *научные положения и принципы*, на базе которых обеспечивается идентификация результатов выводного контроля в аспектах надежности готовой продукции и ее функциональной безопасности.

Основная часть – положения и принципы экспертизы качества продукции замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций

Имитационное моделирование возможных рисков и опасностей при реализации на практике ЗЦОКМ [13] показывает важную необходимость контроля выводного качества конверсионной продукции на системной основе. Поэтому первый принцип, который должен лежать в основе концепции метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС, – объективная достаточность точности и достоверности измерений, сформированных на их основе прогнозов о фактическом техническом состоянии и ресурсе конверсионных материалов. Следует отметить, что экспертиза качества продукции ЗЦОКМ АЭС предполагает, что будут дополнительные затраты на культуру безопасности и качество эксплуатации ядерной техники и энергетических объектов. Поэтому второй принцип для построения метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС – умеренность в затратах индустриального производства для ликвидации опасного ядерного наследия. Для этого необходимы оценки стоимости услуг по технологическому обслуживанию, вероятностные данные о расходе материалов и инструмента, а также сведения о динамике изменений первоначальных заданий. Характеристики конверсионной продукции как объекта технологического обслуживания можно получить в процессе анализа многомерных статистических данных о безопасности жизненного цикла обращения с демонтированными конструктивными компонентами АЭС. На основе данного принципа можно оценить вероятности изменений заданий и состояния внешней среды в ходе решения задач ЗЦОКМ АЭС. Вместе с этим значимые факторы для обеспечения радиационной защиты всех видов деятельности при обращении с демонтированными конструкциями и радиоактивными отходами для всех периодов реализации ЗЦОКМ АЭС значительно будут влиять на архитектуру метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС. В первую очередь это будут факторы: многоуровневой неопределенности рисков при реализации ЗЦОКМ АЭС и неподготовленности нормативно-правовой базы для повторного использования конструкционных материалов АЭС по новому назначению после их окончательной дезактивации и вторичной конверсионной переработки. В этой связи научные положения и подход, принципы проектирования метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС важно ориентировать на реализацию технических решений, открывающих перспективную возможность высвободить из-под радиационного контроля материалы демонтажа конструкций и изделий, пригодных для повторного использования с целью развития атомной индустрии и смежных с ней отраслей промышленности, ТЭК на платформе эффективности и рационального использования природных и иных ресурсов.

Рыночные условия хозяйственной деятельности в атомной промышленности требуют [14], чтобы величина затрат на условную единицу полезного эффекта ЗЦОКМ АЭС была меньше, чем у продукции конкурента. Важная роль для улучшения соотношения «рыночная цена/качество» конверсионной продукции ЗЦОКМ АЭС отводится интегрированной с производственными процессами информационной среде выходного контроля надежности и функциональной безопасности такой продукции. Целевая функция этой среды [15] состоит не только в реализации принципа единства диагностических измерений для всех этапов жизненного цикла продукции ЗЦОКМ АЭС, но и в обеспечении метрологическими эталонами и стандартными образцами соответствующих производственных структур на базе объективных служебных характеристик и показателей качества готовой продукции. Это создает необходимые условия для создания и применения специализированных АСУ ТП, которые в свою очередь повышают конкурентную способность конверсионной продукции. Поэтому концепцию метода экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС следует рассматривать совместно с системами управления качеством, управления ресурсами и процессами производства на базе стандартов качества ИСО 9000:2000, ИСО 15531 и рекомендаций МЭК [16].

Сказанным выше в целом определяется свод концептуальных положений и научные принципы совершенствования методов и технологии выходного контроля качества продукции оригинальных производств ЗЦОКМ АЭС.

Пример метода экспертизы качества продукции оригинальных производств по конверсии демонтированных конструктивных компонентов АЭС

К числу основных результатов оригинальных производств ЗЦОКМ АЭС следует отнести показатели достоверности выходного контроля качества выпускаемой продукции, конверсионных металлических материалов для АЭС. В первую очередь к ним относятся вероятности пропуска брака в ходе

технологической проверки соответствия состояния готовой продукции заданным техническим условиям. Пока методы и критерии для оценки качества и служебных показателей продукции в формате ЗЦОКМ АЭС, экспертной оценки возможности ошибок при выполнении технологических процедур выходного контроля основываются на применении совокупности методов неразрушающих испытаний, технической диагностики и технологического контроля [17, 18], но они рассмотрены недостаточно полно. В этой связи возможный путь к решению указанной задачи состоит в следующем.

Предположим, что при каждой процедуре выходного контроля качества конверсионных материалов АЭС в формате производств ЗЦОКМ контролирующей аппаратурой регистрируется информативный параметр диагностического сигнала x_i ($i = 1, \dots, k$), несущий информацию о качестве контролируемого готового продукта. В силу статистического разброса свойств этого продукта или его отдельных служебных показателей надежности, безопасности, экологической приемлемости и прочего для будущего, состав информативных параметров $\{x_i\}$ можно рассматривать как реализацию случайного вектора $\mathbf{x} = (x_1; x_2; \dots; x_k)$. Для определенности можем предположить, что информативные параметры экспертизы качества готового продукта ЗЦОКМ АЭС являются непрерывными случайными величинами. Тогда, согласно статистической теории, правило браковки сводится к проверке выполнения альтернативных неравенств [19]:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}) &= \frac{p(\mathbf{x} | A_1)}{p(\mathbf{x} | A_0)} > L^*; \\ L(\mathbf{x}) &= \frac{p(\mathbf{x} | A_1)}{p(\mathbf{x} | A_0)} < L^*, \end{aligned} \quad (1)$$

где $L(\mathbf{x})$ – отношение правдоподобия; $p(\mathbf{x} | A_0)$ и $p(\mathbf{x} | A_1)$ – условные плотности вероятностей зарегистрировать вектор информативных параметров \mathbf{x} в случае годного (гипотеза A_0 об отсутствии дефектов) и негодного (альтернативная гипотеза A_1 о наличии несоответствия техническим условиям) для готового продукта изделий; L^* – критическое значение, рассчитываемое с помощью выбранного критерия обнаружения [20].

Заметим, что в случае нормального распределения взаимозависимых компонент $\{x_i\}$ вектора \mathbf{x} для вычисления $L(\mathbf{x})$ применяют выражения, приведенные в работах [15, 18–20]. Однако последние справедливы при условии равенства средних значений и дисперсий случайных параметров $\{x_i\}$. Эти условия характерны для повторных, многократных экспертиз качества одинаковых конверсионных материалов и изделий, реализуемых одним и тем же методом. В случае, если по технологическим условиям выходного контроля качества в формате производства ЗЦОКМ АЭС различными диагностическими методами [17, 18] указанные условия не выполняются, тогда условные плотности вероятностей $p(\mathbf{x} | A_0)$ и $p(\mathbf{x} | A_1)$ в (1) можно установить по данным предварительных испытаний изделий двух серий, о которых априорно известно, что они содержат только негодные и годные изделия. Эти серии называют «обучающими» сериями серийного производства в формате ЗЦОКМ АЭС [1].

Выберем готовый продукт ЗЦОКМ АЭС, например некоторое изделие, изготовленное из конструкционного материала демонтированных конструктивных компонентов ядерного реактора, и про-контролируем его служебные показатели совокупностью технических средств. В дальнейшем параметры распределений служебных характеристик таких изделий ЗЦОКМ АЭС будем снабжать индексом q , принимающим значения 0 или 1 соответственно для годных и негодных изделий. Получим вектор служебных параметров изделия \mathbf{x} . При принятом допущении он описывается нормальным законом распределения [12, 18, 20]. Пусть через $\mathbf{x}_q = (x_{q1}; x_{q2}; \dots; x_{qn})$ – среднее значение вектора параметров \mathbf{x} , а $\{\sigma_{qi}^2\}$, ($i = 1, \dots, k$) – их дисперсии. Индекс q принимает значения 0 или 1 в зависимости от того, из какой серии технологической операции выходного контроля было взято готовое изделие. Характеристики x_{qi} и σ_{qi}^2 вычисляются по хорошо известным выражениям [12, 20]. Если

ввести нормированный вектор \mathbf{n}_q с компонентами $n_i^{(q)} = (x_i - \bar{x}_{qi})/\sigma_{qi}$, ($i=1,\dots,k$), тогда плотность вероятности зарегистрировать в результате испытаний выбранного изделия реализацию \mathbf{x} можно записать в виде

$$p(\mathbf{x}; \mathbf{x}_q) = \exp\left(-\mathbf{n}_q^\top \mathbf{R}_q^{-1} \mathbf{n}_q / 2\right) / \left(2\pi\right)^{k/2} \sqrt{\det \mathbf{R}_q} \prod_{i=1}^k \sigma_{qi}. \quad (2)$$

Здесь и далее \mathbf{R}_q^{-1} – матрица, обратная ковариационной матрице \mathbf{R}_q , элементы которой являются коэффициентами корреляции между компонентами вектора \mathbf{x} :

$$(\mathbf{R}_q)_{ij} = \begin{cases} r_{ij}^{(q)}, & i \neq j; (i, j = 1, \dots, k); \\ 1, & i = j. \end{cases}$$

Штрих у векторов и индекс «т» у матриц в дальнейшем будут означать операцию транспонирования.

Вектор \mathbf{x}_q ($q=1,2$) меняется от изделия к изделию в каждой серии по причине неизбежных небольших неконтролируемых (случайных) изменений технологических условий производства. Следовательно, он также является случайным вектором, дисперсия компонент которого характеризует рассеяние технических характеристик годных и негодных изделий каждой серии готового продукта ЗЦОКМ АЭС. Для нормального закона распределения взаимозависимых компонент вектора \mathbf{x}_q запишем выражение для плотности вероятности, чтобы получить при экспертизе качества изделий в условиях производства ЗЦОКМ АЭС из соответствующих контролируемых партий среднее значение $\tilde{\mathbf{x}}_q$:

$$p(\mathbf{x}_q; \tilde{\mathbf{x}}_q) = \exp\left(-\mathbf{v}_q^\top \mathbf{T}_q^{-1} \mathbf{v}_q / 2\right) / \left(2\pi\right)^{k/2} \sqrt{\det \mathbf{T}_q} \prod_{i=1}^k \tilde{\sigma}_{qi}, \quad (3)$$

где вектор \mathbf{v}_q имеет координаты $v_i^{(q)} = (x_{qi} - \tilde{x}_{qi})/\tilde{\sigma}_{qi}$; $\tilde{\mathbf{x}}_q$ – вектор средних значений \mathbf{x}_q , характеризующий усредненные информативные параметры соответственно всех бездефектных и дефектных изделий «обучающих» партий. Остальные обозначения введены по аналогии с обозначениями формулы (2).

Условные плотности вероятностей, входящие в неравенства (1), можно рассчитать по формуле

$$p(\mathbf{x} | A_q) = \int p(\mathbf{x}; \mathbf{x}_q) p(\mathbf{x}_q; \tilde{\mathbf{x}}_q) d\mathbf{x}_q. \quad (4)$$

Интегрирование проводится по области изменения параметров \mathbf{x}_q , ($q=0,1$). После подстановки соответствующих плотностей вероятности (4) принимают вид

$$p(\mathbf{x} | A_q) = \left(\prod_{i=1}^k \sigma_{qi} \tilde{\sigma}_{qi} \right)^{-1} \left/ \left(2\pi\right)^k \sqrt{\det \mathbf{R}_q \det \mathbf{T}_q} \int \exp\left\{-\left[\mathbf{n}_q^\top \mathbf{R}_q^{-1} \mathbf{n}_q - \mathbf{v}_q^\top \mathbf{T}_q^{-1} \mathbf{v}_q\right] / 2\right\} d\mathbf{x}_q \right..$$

В результате вычислений легко убедиться, что $p(\mathbf{x} | A_q)$, ($q=0,1$) подчиняются нормальному закону распределения:

$$p(\mathbf{x} | A_q) = \left[\left(\prod_{i=1}^k \sigma_{qi} \right)^{-1} \det(\mathbf{L}_q^{-1}) \right] \left/ \left(2\pi\right)^k \sqrt{\det \mathbf{R}_q \det \mathbf{T}_q} \right. \exp\left\{-\left[\mathbf{y}_q^\top \mathbf{H}_q^{-1} \mathbf{y}_q\right] / 2\right\},$$

а отношение правдоподобия $L(\mathbf{x})$ в соотношениях (1) принимает вид

$$L(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{\det \mathbf{R}_0 \det \mathbf{T}_0}{\det \mathbf{R}_1 \det \mathbf{T}_1}} \frac{\det \mathbf{L}_1^{-1}}{\det \mathbf{L}_0^{-1}} \prod_{i=1}^k \frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{1i}} \exp\left\{-\left[\mathbf{y}_1^\top \mathbf{H}_1^{-1} \mathbf{y}_1 - \mathbf{y}_0^\top \mathbf{H}_0^{-1} \mathbf{y}_0\right] / 2\right\}.$$

В последних выражениях приняты обозначения: \mathbf{y}_p , ($p=0,1$) – вектора с компонентами $y_i^{(p)} = (x_i - \tilde{x}_{pi})/\tilde{\sigma}_{pi}$; матрицы \mathbf{H}_p определяются следующими выражениями:

$$\mathbf{H}_p = \mathbf{Z}_p - \mathbf{Z}_p \mathbf{G}_p^{-1} \mathbf{Z}_p; \quad \mathbf{Z}_p = \mathbf{D}_p^T \mathbf{N}_p^{-1} \mathbf{D}_p;$$

элементы диагональной матрицы \mathbf{D}_p равны $(D_p)_{ij} = \delta_{ij} \tilde{\sigma}_{pi} / \sigma_{pi}$ (δ_{ij} – символ Кронекера); $\mathbf{G}_p = \mathbf{Z}_p + \mathbf{T}_p^{-1}$; матрицы \mathbf{L}_p^{-1} – обратные к треугольной матрице \mathbf{L}_p , являющейся разложением Холлерицкого [15, 20], т.е. симметричной матрицы $\mathbf{G}_p = \mathbf{L}_p^T \mathbf{L}_p$. Если ввести матрицу \mathbf{B} с элементами $B_{ij} = \delta_{ij} \tilde{\sigma}_{0i} / \tilde{\sigma}_{1i}$ и вектор с координатами $u_{ij} = (\tilde{x}_{0i} - \tilde{x}_{1i}) / \tilde{\sigma}_{0i}$, можно записать соотношение, связывающее векторы \mathbf{y}_0 и \mathbf{y}_1 , $\mathbf{y}_1 = \mathbf{B}(\mathbf{y}_0 - \mathbf{u})$, тогда соотношение правдоподобия можно представить в виде

$$L(\mathbf{x}) = L(\mathbf{y}_0) = W \exp\left\{-[\mathbf{y}'_0 (\mathbf{B}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{B} - \mathbf{H}_0) \mathbf{y}_0 + 2\mathbf{u}' \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{B} \mathbf{y}_0]/2\right\}, \quad (5)$$

в котором константа W равна

$$W = \sqrt{\frac{\det \mathbf{R}_0 \det \mathbf{T}_0}{\det \mathbf{R}_1 \det \mathbf{T}_1}} \frac{\det \mathbf{L}_1^{-1}}{\det \mathbf{L}_0^{-1}} \prod_{i=1}^k \frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{1i}} \exp\left\{-[\mathbf{m}' \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{B} \mathbf{m}] / 2\right\}.$$

Отношение правдоподобия (5) являются обобщением известных формул, полученных в предположении равенства средних значений $\tilde{x}_{0i} = \tilde{x}_{1i}$ [18, 20] или среднеквадратических отклонений $\sigma_{0i} = \tilde{\sigma}_{0i} = \sigma_{1i} = \tilde{\sigma}_{1i}$ [12].

Выбор критического значения отношения правдоподобия в формуле (1) L^* зависит от выбранного критерия обнаружения и связан с задачей определения вероятности ошибок контроля первого α_1 и второго α_2 рода [12]. Для этого введем функцию

$$\beta(s) = \ln \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[sL(\mathbf{y}_0)] p[L(\mathbf{y}_0) | A_0] d\mathbf{y}_0 \right\}, \quad (0 \leq s \leq 1). \quad (6)$$

Здесь параметр s – корень уравнения $d\beta(s)/ds = \ln L^*$; $p[L(\mathbf{y}_0) | A_0]$ – условная плотность вероятности распределения отношения правдоподобия $L \equiv L(\mathbf{y}_0) \equiv L(\mathbf{x})$, как функция вектора \mathbf{y}_0 – в случае справедливости гипотезы A_0 о годности изделия. Поскольку $L = L(\mathbf{x})$ зависит от случайного вектора \mathbf{x} , отношение правдоподобия можно рассматривать как случайную величину, плотность вероятности которой в случае справедливости гипотезы A_0 о годности (соответствию показателям качества) контролируемого изделия выражается через функцию $\beta(s)$ следующим образом:

$$p_s(L) = p(L | A_0) \exp\{sL\} / \exp\{\beta(s)\}, \quad (7)$$

где принято обозначение $p(L | A_0) = p(L(\mathbf{x}) | A_0)$. Вероятности ошибок контроля при этом рассчитываются по формулам при $s = s^*$, рассчитываемого на основании используемого критерия обнаружения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \exp\{\beta(s) - s \ln L^*\} \int_0^\infty \exp\{-s\sqrt{\beta''(s)}\} p_s(L) dL; \\ \alpha_2 &= \exp\{\beta(s) + (1-s) \ln L^*\} \int_{-\infty}^0 \exp\{(1-s)\sqrt{\beta''(s)}\} p_s(L) dL. \end{aligned} \quad (8)$$

В работах [15, 20] показано, что функцию $\beta(s)$ можно представить в виде

$$\beta(s) = s \ln W + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{z_i^2}{1 - \lambda_i s} s^2 - \ln(1 - \lambda_i s) \right]. \quad (9)$$

Для нашего случая параметры, входящие в формулу (7), имеют следующий смысл: λ_i – собственные значения матрицы $(\mathbf{F}^{-1})^T (\mathbf{H}_0 - \mathbf{B}^T \mathbf{H}_0 \mathbf{B}) \mathbf{F}^{-1}$ (\mathbf{F} – верхняя треугольная матрица,

представляющая собой разложение Холлерицкого матрицы \mathbf{H}_0 ; z_i – координаты вектора $\mathbf{z} = \mathbf{m}' \mathbf{B} \mathbf{F}^{-1} \mathbf{Q}$ (в свою очередь, матрица \mathbf{Q} составлена таким образом, что ее столбцами являются ортогональные собственные векторы матрицы $(\mathbf{F}^{-1})^T (\mathbf{H}_0 - \mathbf{B}^T \mathbf{H}_0 \mathbf{B}) \mathbf{F}^{-1}$). Функция $\beta(s)$ удовлетворяет условиям $\beta(0) = \beta(1) = 0$, которые можно использовать для проверки выполненных расчетов. Соотношения (7) являются обобщением формул для расчетов вероятностей ошибок экспертизы качества изделий и сложных динамических систем выходного контроля конверсионной продукции [12, 20], которые справедливы на случай произвольного закона распределения случайной величины $L(\mathbf{x})$. В частности, можно убедиться, что в случае нормального распределения компонент вектора информативных параметров при выходном контроле в условиях серийного производства предприятий ЗЦОКМ АЭС вероятности ошибок первого и второго рода вычисляются по формулам

$$\alpha_j = \exp[-\vartheta_j(s)] \left\{ \exp(\gamma_j^2/2) [1 - F(\gamma_j)] \left[1 + \sum_{k=3}^{\infty} \frac{(-1)^{kj}}{k!} c_k \gamma_j^k \right] - \right. \\ \left. - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=3}^{\infty} \sum_{m=0}^{k-1} \frac{(-1)^{(k+m)j}}{k!} c_k \gamma_j^{k-m-1} H_m(0) \right\}, \quad (j=1, 2), \quad (10)$$

где $\vartheta_j(s) = \beta(s) + a_j \beta'(s)$; $a_1 = -s$; $a_2 = 1 - s$; $\gamma_j = a_j \sqrt{\beta''(s)}$; $F(\gamma_j) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{\gamma_j} \exp(-x^2/2) dx$ – интеграл ошибок; $H_m(0)$ – значение полинома Эрмита m -го порядка в точке нуль. Коэффициенты c_k – суть полиномы Эрмита от аргумента M , в которых показатели степени заменены на индексы, например: $c_3 = M^{(3)} - 3M^{(1)}$; $c_4 = M^{(4)} - 6M^{(2)} + 3$ и т.д., а величины $M^{(k)}$ вычисляются по формуле

$$M^{(k)} = \frac{\exp[-\vartheta_1(s)]}{[\beta''(s)]^{k/2}} \frac{d^k}{ds^k} \left\{ \exp[\vartheta_1(s)] \right\},$$

т.е. те же выражения, что и приводятся в известных работах [12, 18, 20].

Значение L^* выбирается в соответствии с используемым критерием принятия решений о качестве и надежности поставляемых предприятием ЗЦОКМ АЭС изделий и конструкционных материалов. Целесообразность выбора того или иного критерия зависит от наличия априорной информации о контролируемой партии изделий, например, сведений о вероятности существования дефектных изделий, рисков решения для показателей безопасности последующих процессов и др. Для учета таких рисков в нашем случае экспертизы качества продукции замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций ограничимся рассмотрением только критериев Байеса, Неймана-Пирсона и минимаксного [12, 18, 20]. Их использовании подразумевает знание в различном объеме априорной диагностической информации об изделиях поставляемых предприятием ЗЦОКМ АЭС. Операции при вычислении порогового значения и ошибок экспертизы качества этих изделий на разных периодах серийного производства могут быть приняты по рекомендациям [21] и для различных статистических критериев заключаются в следующем:

- 1) определение функции $\beta(s)$ по формуле (6) с предварительным расчетом элементов соответствующих матриц \mathbf{R} , \mathbf{T} и др.;
- 2) вычисление параметра s^* из уравнения, вид которого определяется используемым статистическим критерием (табл. 1);
- 3) определение порогового значения отношения правдоподобия $\ln L^* = \beta'(s^*)$;
- 4) определение ошибок экспертизы качества продукции ЗЦОКМ АЭС на этапе их изготовления α_1 и α_2 по формулам (8) или (10) в зависимости от закона распределения информативных параметров при значении параметра $s = s^*$ и среднего риска обнаружения дефектов при экспертизе качества согласно таблицы о правилах разбраковки в формате технологического контроля. В таком варианте исходные данные получают на основе анализа статистической информации о результатах выходного

контроля качества промышленных изделий ЗЦОКМ АЭС и полученных рекламаций на эти изделия. При отсутствии статистически значимой информации об перечисленных выше показателях качества изделий ЗЦОКМ АЭС можно применить критерий Неймана – Пирсона. В этом случае s^* определяют из условия ограничения вероятности ошибки первого рода заданной величиной α_1^* .

Таблица 1

Порядок определения порогового значения в правиле браковки и среднего риска экспертизы качества продукции на предприятиях ЗЦОКМ АЭС при использовании различных критериев

Критерий	Априорные данные	Уравнение для расчета s^*	$\ln L^*$	Средний риск экспертизы качества продукции
Байеса	$S_0; S_1; p_0; p_1$	$\beta'(s^*) = \ln\left(\frac{S_0 p_1}{S_1 p_0}\right)$	$\ln\left(\frac{S_0 p_1}{S_1 p_0}\right)$	$\alpha_1(s^*) S_0 p_1 + \alpha_2(s^*) S_1 p_0$
Минимаксный	$S_0; S_1$	$S_0 \alpha_1(s^*) = S_1 \alpha_2(s^*)$	$\beta'(s^*)$	$\frac{S_0 S_1 \{\alpha_1(s^*) \exp[\beta'(s^*)] + \alpha_2(s^*)\}}{S_0 + S_1 \exp[\beta'(s^*)]}$
Неймана – Пирсона	–	$\alpha_1(s^*) = \alpha^*$	$\beta'(s^*)$	–

$p_0; p_1$ – априорные вероятности присутствия в аттестуемой серии годных и негодных изделий; $S_0; S_1$ – стоимости потерь от ошибок технологического контроля 1-го и 2-го рода (совокупная цена отбраковки годного (стоимость производственных потерь) и цена ответственности за выпуск негодного изделия в эксплуатацию.

Заключение

К основным отличительным чертам предлагаемого метода экспертизы и диагностического контроля качества специфической продукции оригинальных производств по утилизации демонтированных конструктивных элементов атомных станций в период их вывода из эксплуатации с позиций перспективной инновации физико-технологического профиля можно отнести следующие.

Доказательство справедливости утверждения о том, что многопараметрический выходной контроль надежности и безопасности продукции серийных предприятий ЗЦОКМ АЭС важен при принятии соответствующего инженерно-технического и финансово-управленческого решения о возможности полномасштабной реализации замкнутого цикла обращения конструкционных материалов ЯЭУ в текущий период и на перспективу развития атомной энергетики.

Значительный технико-экономический эффект от реализации замкнутого цикла обращения конструкционных материалов ЯЭУ уменьшает вероятность финансовых и иных возможных материальных потерь, уже на этапе масштабной реализации рассматриваемой инновации снижает риск нерационального использования людских и природных ресурсов страны.

Предложен метод реализации процедуры экспертизы и диагностического контроля качества специфической продукции оригинальных производств по утилизации демонтированных конструктивных элементов атомных станций и соответствующие интегро-дифференциальные параметры для оценивания различных аспектов качества инноваций в этой сфере деятельности. Значимость этих параметров, необходимая для количественных оценок эффективности и приемлемости инновационных технических решений, существенная в аспектах развития индустриальных способов вывода из эксплуатации АЭС по моделям ЗЦОКМ АЭС.

Таким образом, предложенное выше научно-методическое обеспечение процедуры экспертизы качества продукции замкнутого цикла обращения с конструкционными материалами атомных станций позволяет осуществить все этапы экспертного анализа перспективы и рисков применения моделей ЗЦОКМ АЭС. Затем получить достаточно обоснованные результаты экспертизы качества инновационных технических решений для будущего массового вывода из эксплуатации АЭС и ликвидации их вредного ядерного наследия. Эти результаты крайне необходимы для принятия рациональных финансово-управленческих и организационно-технических решений в различных отраслях национальной экономики страны в целях практической реализации интеллектуально-креативных резервов. Вместе с этим для условий реального производства предложенный метод экспертизы качества позволяет выбрать оптимальную по физико-технологическим и экономическим критериям процедуру выходного контроля продукции серийных предприятий ЗЦОКМ АЭС, которая обеспечивает минимум

вероятности пропуска брака при минимальной стоимости контроля качества серийных изделий и продукции. Кроме того, метод позволяет в практической деятельности оценить вероятности ошибок метрологического контроля качества приборов мониторинга технического состояния и автоматики комплексного технологического процесса по утилизации демонтированных конструктивных компонентов АЭС.

Список литературы

1. Сафонова Н. Н. Научно-методические подходы вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС на промышленной основе // Ядерная и радиационная безопасность. 2025. № 1 (115). С. 41–51. doi: 10.26277/SECNRS.2025.115.1.001
2. Семченков Ю. М., Былкин Б. К., Зверков Ю. А. [и др.]. Особенности опыта организации и выполнения работ по выводу из эксплуатации блоков АЭС за рубежом: анализ, выводы и рекомендации // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2022. Вып. 5. С. 124–136.
3. Блинова И. В., Соколова И. Д. Состояние работ по выводу АЭС из эксплуатации (обзор) // Атомная техника за рубежом. 2017. № 5. С. 3–18.
4. Сидоренко В. А. Водоводяные энергетические реакторы. Начало и результат. М. : НТЦ ЯРБ, 2018. 152 с.
5. Прокуряков К. Н. Ядерные энергетические установки. М. : Изд. дом МЭИ, 2015. 446 с.
6. Былкин Б. К., Енговатов И. А. Вывод из эксплуатации реакторных установок : монография. М. : МГСУ, 2014. 228 с.
7. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Иванов А. Ю. [и др.]. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий. М. : Комтехпринт, 2017. Т. 1. 336 с.
8. Nuclaer Decommissioning: Planning, Execution and International Experience / ed. by Michele Laraia // IAEA, Woodhead Publishing Series in Energy. 2012. № 36.
9. Новиков Г. А., Ташлыков О. Л., Щекlein С. Е. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии : учебник / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г. А. Новикова. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 552 с.
10. Прокуряков К. Н., Хвостова М. С. Разработка методов и средств повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200 // Глобальная ядерная безопасность. 2024. № 14. С. 29–36.
11. Шилова Л. А., Пустовгар А. А. Информационное моделирование закрытие АЭС // Энергетическая политика. 2021. № 2. С. 72–84.
12. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 568 с.
13. Васильева С. В., Коновалова О. В., Панкин А. М. [и др.]. Управление рисками энергетических ядерных объектов топливно-энергетического комплекса на основе измерительной диагностики их технического состояния // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 114–122.
14. Файков Д. Ю., Байдаров Д. Ю. Диверсификация производств в атомной отрасли // Экономическое возрождение России. 2020. № 3. С. 96–109.
15. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. Испытания и контроль качества материалов и конструкций : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 2004. 360 с.
16. Родионов В. Я., Козлов В. В., Тутнов И. А. Система качества в ядерном приборостроении // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2007. № 2. С. 3–16.
17. Коллакот Р. Диагностика повреждений. М. : Мир, 1989. 518 с.
18. Панкин А. М. Обработка результатов измерений в задачах технической диагностики : учеб. пособие. СПб. : Политех-Пресс, 2022. 202 с.
19. Барзов А. А., Кузнецов А. В., Пузаков В. С., Сысоев Н. Н. Предиктивные мезотехнологии (на примере энергоэкстремальной гидроструйной диагностики функционального качества). М. : МГУ имени М. В. Ломоносова. Физический факультет, 2022. 225 с.
20. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений : пер с нем. М. : Мир, 1990. 208 с.
21. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. [и др.]. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. М. : Наука, 1999. 360 с.

References

1. Safronova N.N. Scientific and methodological approaches to decommissioning nuclear power plants on an industrial basis. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and radiation safety*. 2025;(1):41–51. (In Russ.). doi: 10.26277/SECNRS.2025.115.1.001
2. Semchenkov Yu.M., Bylkin B.K., Zverkov Yu.A. et al. Features of the experience of organizing and performing decommissioning of NPP units abroad: analysis, conclusions and recommendations. *Voprosy atomnoy nauki*

- i tekhniki. Ser.: Fizika yadernykh reaktorov = Issues of atomic science and technology. Ser.: Physics of nuclear reactors.* 2022;(5):124–136. (In Russ.)
3. Blinova I.V., Sokolova I.D. The state of work on decommissioning nuclear power plants (review). *Atomnaya tekhnika za rubezhom = Nuclear technology abroad.* 2017;(5):3–18. (In Russ.)
 4. Sidorenko V.A. *Vodovodyanye energeticheskiye reaktory. Nachalo i rezul'tat = Water-water power reactors. The beginning and the result.* Moscow: NTTS YARB, 2018:152. (In Russ.)
 5. Proskuryakov K.N. *Yadernyye energeticheskiye ustanovki = Nuclear power plants.* Moscow: Izd. dom MEI, 2015:446. (In Russ.)
 6. Bylkin B.K., Yengovatov I.A. *Vyvod iz ekspluatatsii reaktornykh ustanovok: monografiya = Decommissioning of reactor installations : a monograph.* Moscow: MGSU, 2014:228. (In Russ.)
 7. Tsebakovskaya N.S., Utkin S.S., Ivanov A.Yu. et al. *Luchshiye zarubezhnyye praktiki vyvoda iz ekspluatatsii yadernykh ustanovok i reabilitatsii zagryaznennykh territoriy = The best foreign practices of decommissioning of nuclear installations and rehabilitation of contaminated territories.* Moscow: Komtekprint, 2017;1:336. (In Russ.)
 8. Laraia Michele (ed.). Nuclaer Decommissioning: Planning, Execution and International Experience. *IAEA, Wood-head Publishing Series in Energy.* 2012;(36).
 9. Novikov G.A., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. *Obespecheniye bezopasnosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii: uchebnik = Safety assurance in the field of atomic energy use : textbook.* Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2017:552. (In Russ.)
 10. Proskuryakov K.N., Khvostova M.S. Development of methods and means to improve the environmental, radiation and industrial safety of nuclear power plants with VVER-1200. *Global'naya yadernaya bezopasnost' = Global nuclear safety.* 2024;(14):29–36. (In Russ.)
 11. Shilova L.A., Pustovgar A.A. Information modeling of NPP closure. *Energeticheskaya politika = Energy policy.* 2021;(2):72–84. (In Russ.)
 12. Severtsev N.A., Yurkov N.K. *Bezopasnost' dinamicheskikh sistem na etapakh zhiznennogo tsikla: monografiya = Safety of dynamic systems at the stages of the life cycle : monograph.* Penza: Izd-vo PGU, 2023:568. (In Russ.)
 13. Vasil'yeva S.V., Konovalova O.V., Pankin A.M. et al. Risk management of nuclear power facilities of the fuel and energy complex based on measurement diagnostics of their technical condition. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(1):114–122. (In Russ.)
 14. Faykov D.Yu., Baydarov D.Yu. Diversification of production in the nuclear industry. *Ekonomicheskoye vozrozhdeniye Rossii = The economic revival of Russia.* 2020;(3):96–109. (In Russ.)
 15. Baranov V.M., Karasevich A.M., Sarychev G.A. *Ispytaniya i kontrol' kachestva materialov i konstruktsiy: ucheb. posobiye = Testing and quality control of materials and structures : a textbook.* Moscow: Vyssh. shk., 2004:360. (In Russ.)
 16. Rodionov V.Ya., Kozlov V.V., Tutnov I.A. Quality system in nuclear instrumentation. *Yadernyye izmeritel'no-informatsionnyye tekhnologii = Nuclear measurement and information technologies.* 2007;(2):3–16. (In Russ.)
 17. Kollakot R. *Diagnostika povrezhdeniy = Diagnostics of damage.* Moscow: Mir, 1989:518. (In Russ.)
 18. Pankin A.M. *Obrabotka rezul'tatov izmereniy v zadachakh tekhnicheskoy diagnostiki: ucheb. posobiye = Processing of measurement results in the tasks of technical diagnostics : a textbook.* Saint Petersburg: Politekh-Press, 2022:202. (In Russ.)
 19. Barzov A.A., Kuznetsov A.V., Puzakov V.S., Sysoyev N.N. *Prediktivnyye mezotekhnologii (na primere energoekstremal'noy gidrostruynoy diagnostiki funktsional'nogo kachestva) = Predictive mesotechnology (using the example of energy-extreme hydrojet diagnostics of functional quality).* Moscow: MGU imeni M.V. Lomonosova. Fizicheskiy fakul'tet, 2022:225. (In Russ.)
 20. Mushik E., Myuller P. *Metody prinyatiya tekhnicheskikh resheniy: per s nem. = Methods of making technical decisions : translated from German.* Moscow: Mir, 1990:208. (In Russ.)
 21. Baranov V.M., Karasevich A.M., Sarychev G.A. et al. *Akusticheskaya diagnostika i kontrol' na predpriyatiyakh toplivno-energeticheskogo kompleksa = Acoustic diagnostics and control at enterprises of the fuel and energy complex.* Moscow: Nauka, 1999:360. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Сергеевич Григорьев

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

Aleksandr S. Grigoriev

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

Наталия Николаевна Сафонова

кандидат экономических наук,
заместитель генерального директора,
Ассоциация организаций строительного комплекса
атомной отрасли
(Россия, г. Москва, ул. Обручева, 30/1 стр.1)
E-mail: safronova_nn@accni.ru

Natalia N. Safronova

Candidate of economical sciences,
deputy general director,
Association of Nuclear Industry
Construction Organizations
(build.1, 30/1 Obrucheva street, Moscow, Russia)

Игорь Александрович Тутнов

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

Igor A. Tutnov

Doctor of technical sciences, professor,
head of laboratory,
National Research Center "Kurchatov Institute"
(1 Akademik Kurchatov square, Moscow, 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 25.04.2025

Принята к публикации/Accepted 15.05.2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ НА НАДЕЖНОСТЬ РАДИОСИСТЕМЫ

А. Н. Якимов

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

Аннотация. Актуальность и цели. По мере роста интенсивности воздушного движения летательных аппаратов радиосистемы управления воздушным движением (УВД) сталкиваются с проблемой обеспечения безопасности полетов. Количество безопасность полетов оценивается допустимым риском столкновения летательных аппаратов, который в значительной мере определяется надежностью радиосистемы УВД. Под надежностью при этом понимается не только безотказность работы аппаратуры, но и вероятность потерять информацию из-за провалов в зонах обзора, определяемых характеристиками направленности антенн, используемых в радиосистемах УВД. Перспективной возможностью повышения надежности таких систем является модельное исследование влияния формы главного лепестка диаграммы направленности (ДН) антенны запросчика на надежность радиосистемы УВД. Материалы и методы. Предложен подход к решению этой задачи, основанный на том, что вероятность потери информации из-за провалов в зонах обзора определяется отклонением формы главного лепестка ДН антенны запросчика от идеального секторного вида. Получены расчетные выражения для оценки параметров, характеризующих надежности радиосистемы УВД при использовании ДН гауссовой формы и квазисекторной ДН, представленной модифицированным рядом Котельникова. Построена упрощенная математическая модель ДН трапецеидальной формы, позволяющая исследовать влияние крутизны скатов главного лепестка квазисекторной ДН на надежность радиосистемы УВД. Результаты и выводы. Даны численная оценка надежности радиосистемы на примере использования антенны с ДН гауссовой, квазисекторной и трапецеидальной формой главного лепестка. Приведены результаты модельного исследования влияния крутизны скатов главного лепестка ДН антенны на надежность радиосистемы. Полученные результаты указывают на перспективность использования антенны запросчика с ДН квазисекторной формы для повышения надежности радиосистемы УВД.

Ключевые слова: антenna, диаграмма направленности, главный лепесток, форма, радиосистема, надежность

Для цитирования: Якимов А. Н. Исследование влияния формы главного лепестка диаграммы направленности антенны на надежность радиосистемы // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 82–90. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-8

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE ANTENNA RADIATION PATTERN MAIN LOBE SHAPE ON THE RELIABILITY OF RADIO SYSTEM

A.N. Yakimov

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

Abstract. *Background.* As the intensity of aircraft air traffic increases, air traffic control (ATC) radio systems face the challenge of ensuring flight safety. Flight safety is quantified by the acceptable aircraft collision disk, which is largely determined by the reliability of the ATC radio system. Reliability is understood as only the reliability of the equipment, but also to the likelihood of information loss due to dips in the viewing areas determined by the directional characteristics of the antennas used in ATC radio systems. A perspective opportunity to increase the reliability of such systems is a model study of the effect of the shape of the main lobe of the radiation pattern of the interrogator on the reliability of the ATC radio system. *Materials and methods.* An approach to solving this problem is proposed based on

the fact that the probability of information loss due to dips in the viewing areas is determined by the deviation of the shape of the main lobe of the radiation pattern of the interrogator antenna from the ideal sector. Calculated expressions are obtained for estimating the parameters characterizing the reliability of the ATC radio system when using Gaussian-shaped radiation pattern and quasi-sector radiation pattern, represented by a modified Kotelnikov series. A simplified mathematical model of trapezoidal radiation pattern has been constructed, which makes it possible to study the effect of the slope of the main lobe of a quasi-sector radiation pattern on the reliability of the ATC radio system. *Results and conclusions.* A numerical assessment of the reliability of the radio system is given using the example of using an antenna with a Gaussian, quasi-sector and trapezoidal shape of the radiation pattern main lobe. The results of a model study of the effect of the steepness of the radiation pattern main lobe of the antenna on the reliability of the radio system are presented. The results obtained indicate the prospects of using the antenna of the interrogator with the radiation pattern a quasi-sector shape to increase the reliability of the ATC radio system.

Keywords: antenna, radiation pattern, main lobe, shape, radio system, reliability

For citation: Yakimov A.N. Investigation of the influence of the antenna radiation pattern main lobe shape on the reliability of radio system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):82–90. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-8

Введение

Радиосистемы управления воздушным движением (УВД) по мере роста интенсивности воздушного движения летательных аппаратов (ЛА) сталкиваются с проблемой обеспечения безопасности полетов. Количественно безопасность полетов оценивается допустимым риском столкновения ЛА, который определяется интенсивности движения ЛА, надежностью радиосистем навигации и УВД. При этом под надежностью радиосистем УВД понимается не только безотказность работы аппаратуры, но и вероятность потерь информации из-за провалов в зонах обзора, помех в каналах связи, погрешностей определения местоположения ЛА и другими факторами [1, 2].

В свою очередь, вероятность потерь информации из-за провалов в зонах обзора в значительной мере определяется характеристиками направленности антенн, используемых в радиосистемах УВД. Дальность действия таких систем пропорциональна напряженности электрической составляющей электромагнитного поля, формируемой антенной в направлении ЛА, и зависит от уровня диаграммы направленности (ДН). При работе таких систем в режиме обзора с активным ответом ЛА, перспективным для передачи запросного сигнала оказывается использование микроволновой антенны с ДН секторного вида.

Математический синтез такой ДН относят к некорректным задачам математической физики, решение которых может быть получено лишь с некоторым приближением, поэтому возникает задача оценки близости формируемой квазисекторной ДН к идеальной секторной ДН и вероятности потерь информации из-за провалов в зонах обзора, вызванных отклонением ДН от секторного вида [3–5].

Рассмотрим возможности модельной оценки влияния формы главного лепестка ДН антенны запросчика на надежность радиосистемы УВД, обусловленного потерей информации из-за провалов в зоне обзора.

Постановка задачи

Для корректного исследования влияния формы главного лепестка ДН антенны запросчика на надежность радиосистемы УВД примем следующие допущения: пренебрегаем влиянием на надежность радиосистемы всех факторов, кроме потерь информации из-за провалов в зонах обзора, и полагаем нахождение ЛА в каждой точке сектора зоны обзора в заданный момент времени равновероятным. Полагаем также, что ДН антенны запросчика в вертикальной плоскости имеет косекансную форму, обеспечивающую равенство уровня запросного сигнала у антенны ответчика ЛА, летящего на заданной высоте, при любом его угловом положении в вертикальной плоскости относительно антенны запросчика, и исключено влияние боковых лепестков ДН. При работе радиосистемы УВД на максимальных дальностях из-за пропорциональности уровня сигнала запросчика уровню ДН его антенны полю в направлении местоположения ЛА и провалов в зонах обзора уровень сигнала запроса оказывается недостаточным для срабатывания ответчика и получения ответного сигнала ЛА [2, 6].

Таким образом, рабочая зона обзора радиосистемы УВД в горизонтальной плоскости в данный момент времени оказывается ограниченной интервалом углов между уровнями половинной мощности (-3 дБ) относительно максимума ДН антенны и дальностью действия радиосистемы в заданном угловом направлении, зависящей от формы ДН.

Решение задачи

С учетом принятых допущений, вероятность потерь информации из-за провалов в зонах обзора определяется отклонением ДН антенны запросчика от секторного вида в горизонтальной плоскости обзора и может быть рассчитана по формуле [7]

$$P_{LI} = 1 - P_{RI} = 1 - \frac{S_{ML}}{S_{SECT}}, \quad (1)$$

где P_{LI} – вероятность потерь информации; P_{RI} – вероятность получения информации; S_{ML} – площадь главного лепестка произвольной формы ДН антенны запросчика в интервале углов, соответствующих максимуму и уровню половинной мощности; S_{SECT} – площадь главного лепестка идеальной секторной формы ДН антенны запросчика.

В общем виде площадь S сектора OAB , ограниченного кривой AB произвольной формы, заданной в полярных координатах функцией $\rho = F(\phi)$ в интервале углов $\phi_0 \leq \phi \leq \phi_1$ и радиусами OA и OB (рис. 1), определяется интегралом [8]

$$S = \frac{1}{2} \int_{\phi_0}^{\phi_1} \rho^2 d\phi = \frac{1}{2} \int_{\phi_0}^{\phi_1} [F(\phi)]^2 d\phi, \quad (2)$$

где OAB – сектор, описывающий геометрическую форму главного лепестка в горизонтальном сечении ДН антенны запросчика радиосистемы; ϕ – угол в горизонтальной плоскости.

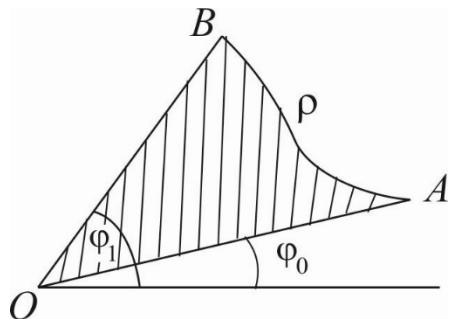


Рис. 1. Иллюстрация к расчету площади главного лепестка
ДН антенны запросчика в горизонтальной плоскости

Главный лепесток идеальной секторной ДН $F_{ML}(\phi) = F_{SECT}(\phi)$ можно представить как сектор круга с углом, равным ширине ДН на уровне половинной мощности, и описать следующим образом [5]:

$$F_{SECT}(\phi) = \begin{cases} 1, & -\phi_{0,5} \leq \phi \leq \phi_{0,5}; \\ 0, & \phi < -\phi_{0,5}, \phi > \phi_{0,5}, \end{cases} \quad (3)$$

где $F = E/E_{max}$ – уровень нормированной амплитудной ДН по полю; E – напряженность электрической составляющей электромагнитного поля в произвольном направлении горизонтального сечения главного лепестка ДН; E_{max} – напряженность электрической составляющей электромагнитного поля в направлении максимума главного лепестка ДН ($\phi = 0^\circ$); ϕ – угол относительно оси излучения антенны, выраженный в градусах; $2\phi_{0,5} = \phi_1 - \phi_0$ (рис. 1) – ширина главного лепестка ДН на уровне половинной мощности.

После подстановки выражения (3) в формулу (2), в результате аналитического решения получим известную формулу, описывающую площадь S_{SECT} сектора круга [8]:

$$S_{ML} = S_{SECT} = \pi r^2 (2\phi_{0,5}) / 360^\circ, \quad (4)$$

где $r = E/E_{max} = 1$ – уровень нормированной ДН по полю.

В соответствии с формулой (1), в радиосистеме УВД с ДН антенны запросчика идеальной секторной формы (3) вероятность получения информации $P_{RI} = S_{ML} / S_{SECT} = 1$, а вероятность потерь информации $P_{LI} = 0$.

Рассмотрим возможности модельной оценки параметров P_{RI} и P_{LI} в радиосистемах УВД с реальными ДН антенны запросчика. При однократной передаче сигнала запроса широко используют математическую модель главного лепестка амплитудной ДН гауссовой формы (рис. 2, кривая 1), описываемой выражением [9]

$$F_{ML}(\phi) = r e^{-1.4\beta^2}, \quad (5)$$

где $F_{ML}(\phi)$ – функция, описывающая главный лепесток ДН; $r = E/E_{max} = 1$ – уровень нормированной ДН по полю; $\beta = \phi/(2\phi_{0.5})$ – угол, нормированный к ширине ДН антенны.

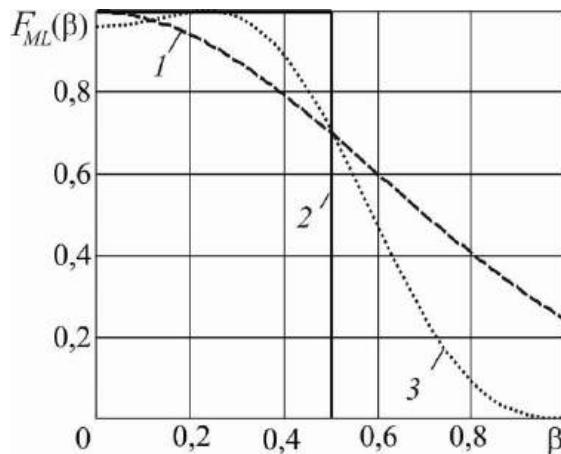


Рис. 2. Нормированные функции, описывающие рабочую зону главного лепестка амплитудной ДН запросчика в горизонтальной плоскости:
1 – идеальная секторная; 2 – гауссова; 3 – квазисекторная

После подстановки выражения (5) в формулу (2) в результате аналитического решения получим расчетное выражение площади S_{ML} рабочей зоны главного лепестка ДН гауссовой формы, описанного выражением (5) в следующем виде:

$$S_{ML} = 0,81 \pi r^2 (2\phi_{0.5}) / 360^\circ. \quad (6)$$

В соответствии с формулой (1), в радиосистеме УВД с ДН антены запросчика с гауссовой формой (5) вероятность получения информации $P_{RI} = S_{ML} / S_{SECT} = 0,81$, а вероятность потери информации $P_{LI} = 0,19$.

При описании ДН антенн математическими выражениями, для которых получение аналитического решения по выражению (2) затруднительно, перспективным оказывается решение задачи в декартовой системе координат. В этом случае, если функция $F_{ML}(\beta)$ является осесимметричной неотрицательной непрерывной на интервале $-0,5 \leq \beta \leq 0,5$, то площадь S_{ML} рабочей зоны главного лепестка ДН может быть получена путем численного интегрирования по выражению [8]

$$S_{ML} = \int_{-0.5}^{0.5} F_{ML}(\beta) d\beta = 2 \int_0^{0.5} F_{ML}(\beta) d\beta, \quad (7)$$

где $\beta_1 = -0,5$; $\beta_2 = 0,5$ – нормированные к $2\phi_{0.5}$ угловые положения ϕ , соответствующие уровню половинной мощности ДН ($0,707 E_{max}$), задающие сектор углов рабочей зоны главного лепестка.

В этом случае главный лепесток идеальной секторной ДН F_{ML} (рис. 2, кривая 2) описывается формулой

$$F_{ML}(\beta) = \begin{cases} 1, & -0,5 \leq \beta \leq 0,5; \\ 0, & \beta < -0,5, \beta > 0,5. \end{cases} \quad (8)$$

При решении задачи приближения математической модели реальной ДН антены запросчика к модели секторной ДН перспективным является описание с квазисекторной ДН $F_{ML}(\phi)$ антены манипулированным рядом Котельникова [5]:

$$F_{MLN}(\beta) = \frac{\sin z}{z} \cdot \frac{k_2 z_1^2 (z_1^2 - 1) + 3z_1^2 - z_1^4 + 4}{(z_1^2 - 1)(z_1^2 - 4)}, \quad (9)$$

где – $F_{MLN}(\beta)$ – функция, описывающая ненормированную ДН антенны по полю в горизонтальной плоскости; $z = \pi(l/\lambda)\sin[\beta(2\phi_{0,5})]$; $\beta(2\phi_{0,5}) = [\phi/(2\phi_{0,5})] \cdot (2\phi_{0,5}) = \phi$ – угол в горизонтальной плоскости между направлением на точку наблюдения и нормалью к антенне; l – линейный размер главного сечения апертуры антенны в горизонтальной плоскости; λ – длина электромагнитной волны в свободном пространстве; k_2 – коэффициент, управляющий формой ДН, величина которого находится в промежутке от 1 до 2; $z_1 = z/\pi$.

При этом коэффициент k_2 связан с параметром $\alpha_0 = 1/y_0$, который характеризует долю противофазного участка в половине амплитудного распределения поля, где y_0 – координата точки смены фазы в амплитудном распределении поля. Взаимосвязь между коэффициентом k_2 и параметром α_0 на интервале изменения α_0 от 1,5 до 2,5 устанавливается выражением

$$k_2 = \frac{1 + 2 \cos(\pi / \alpha_0)}{1 - 2 \cos^2(\pi / \alpha_0)}. \quad (10)$$

Функция $F_{ML}(\beta)$, описывающая нормированную квазисекторную ДН антенны, используемую в расчете площади S_{ML} рабочей зоны главного лепестка ДН по формуле (7), получается как

$$F_{ML}(\beta) = \frac{F_{MLN}(\beta)}{F_{ML \max}}, \quad (11)$$

$F_{ML \ max}$ – максимум функции (9), описывающей главный лепесток ДН, не всегда совпадающий с направлением оси излучения антенны $\beta = 0$.

Расчет квазисекторной ДН $F_{ML}(\beta)$ по формулам (9) и (11) проводился в MatLAB для следующих параметров: $l/\lambda=27$, $k_2 = 0,7$ (рис. 2, кривая 3). При этом ширина квазисекторной ДН запросчика составила $2\phi_{0,5} = 6,6$.

Распределение поля $f(y)$ в горизонтальном сечении апертуры антенны (рис. 3), соответствующее рассматриваемой квазисекторной ДН антенны $F_{ML}(\beta)$ и полученное с использованием модифицированного ряда Котельникова, описывается следующей формулой:

$$f(y) = 1 + 2 \cos \pi y + k_2 \cos 2\pi y, \quad (12)$$

где $y = 2x/l$; x – расстояние до текущей точки главного сечения апертуры антенны относительно ее центра в горизонтальной плоскости.

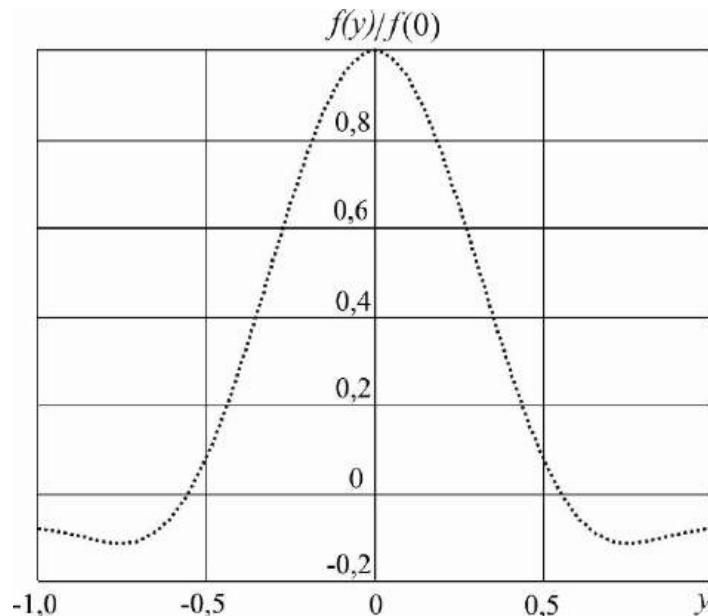


Рис. 3. Нормированное распределение поля в горизонтальном сечении апертуры антенны при $k_2 = 0,7$

Это распределение поля имеет переменно-фазный вид и характеризуется следующими параметрами: максимальный уровень противофазных участков относительно максимума центрального участка равен -19 дБ; $\alpha_0 \approx 1,8$.

Расчет площади S_{ML} рабочей зоны главного лепестка ДН квазисекторной формы (11) антенны запросчика в MatLAB по методу трапеций позволил получить следующие параметры надежности радиосистемы УВД: в соответствии с формулой (1) вероятность получения информации $P_{RI} = S_{ML} / S_{SECT} = 0,94$, а вероятность потерь информации $P_{LI} = 0,06$ [10].

Таким образом, результаты модельной оценки влияния формы главного лепестка ДН запросчика радиосистемы на надежность этой радиосистемы показали, что переход от гауссовой формы главного лепестка к квазисекторной форме приводит к значительному снижению вероятности потерь информации (с $P_{LI} = 0,19$ до $P_{LI} = 0,06$).

Однако влияние таких параметров квазисекторной ДН, как крутизна ее скатов и величина провалов вблизи оси симметрии главного лепестка ДН на надежность радиосистемы, оказывается противоречивым. В рамках рассмотренной математической модели, представленной модифицированным рядом Котельникова, исследование независимого влияния этих параметров на надежность радиосистемы оказывается невозможным [5].

Приняв допущение об отсутствии провалов вблизи оси симметрии квазисекторной ДН (рис. 4, кривая 1), построим упрощенную математическую модель квазисекторной ДН в виде трапеции (рис. 4, кривая 2).

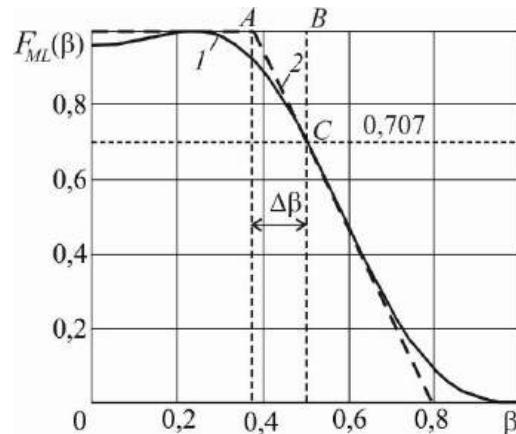


Рис. 4. Модельное представление нормированной квазисекторной ДН:
1 – модифицированным рядом Котельникова при $l/\lambda=27$, $k_2 = 0,7$; 2 – трапецией

В соответствии с рис. 4 зона потенциального пропуска сигнала из-за отличия трапеции от идеального сектора определяется площадью S_{ABC} треугольника. Вследствие симметрии ДН вероятность потерь информации P_{LI} при этом будет определяться как

$$P_{LI} = S_{LI} / S_{SECT}, \quad (13)$$

где $S_{LI} = 2S_{ABC}$ – площадь зоны потерь главного лепестка ДН; $S_{ABC} = 0,5 \cdot (0,293 \cdot \Delta\beta)$.

Вероятность получения информации P_{RI} при этом может быть определена по формуле

$$P_{RI} = 1 - P_{LI}. \quad (14)$$

На основе анализа формы трапеции на уровнях от -1 до -20 дБ и с учетом свойств подобных треугольников получим [8]

$$\Delta\beta \approx \frac{7}{\mu(2\phi_{0,5})}, \quad (15)$$

где $\Delta\beta$ – величина стороны AB треугольника ABC ; μ – крутизна скатов трапеции, дБ/град; $2\phi_{0,5}$ – ширина главного лепестка ДН на уровне половинной мощности, град.

С учетом выражений (13), (15) и значения площади $S_{SECT} = 1$, нормированной идеальной секторной ДН, получим выражение для определения вероятности потерь информации P_{LI}

$$P_{LI} \approx \frac{2,05}{\mu(2\phi_{0,5})}. \quad (16)$$

Выражения (13)–(16) позволяют провести необходимые модельные исследования влияния крутизны скатов ДН антенны запросчика на характеристики надежности радиосистемы и представляют собой упрощенную математическую модель надежности этой радиосистемы.

Полученные результаты

Расчеты характеристик надежности радиосистемы УВД, проведенные для квазисекторной ДН запросчика шириной $2\phi_{0,5} = 6,6$ град в интервале изменения крутизны скатов μ от 2 до 12 дБ/град, показали следующие результаты (рис. 5, кривые 1 и 2).

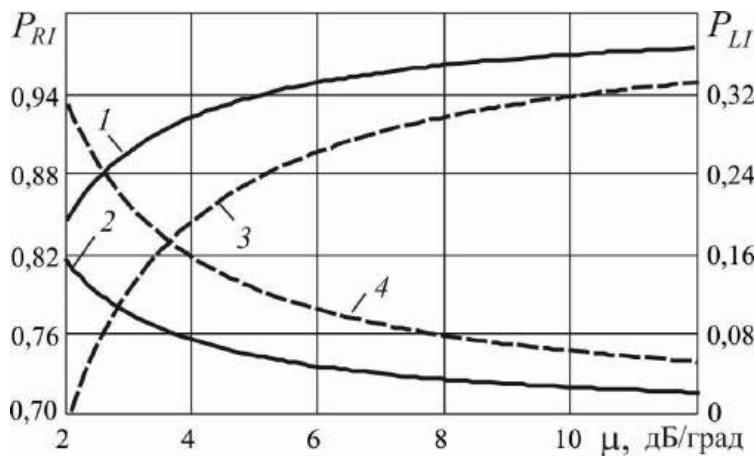


Рис. 5. Характеристики надежности радиосистемы:
1 – P_{RI} для $2\phi_{0,5} = 6,6^\circ$; 2 – P_{LI} для $2\phi_{0,5} = 6,6^\circ$;
3 – P_{RI} для $2\phi_{0,5} = 3,3^\circ$; 4 – P_{LI} для $2\phi_{0,5} = 3,3^\circ$

Влияние крутизны скатов на параметры, характеризующие надежность радиосистемы существенно, причем вероятность приема информации P_{RI} оказывается немного завышенной, так как эта модель не учитывает провалы (пульсации) вблизи оси симметрии главного лепестка ДН. Так, например, вероятность получения информации в радиосистеме с квазисекторной ДН антенны (рис. 4, кривая 1) и крутизной скатов $\mu \approx 7$ дБ/град составляет $P_{RI} \approx 0,94$. Представление главного лепестка ДН в виде трапеции (рис. 4, кривая 2) при той же крутизне скатов уже составляет $P_{RI} \approx 0,955$ (рис. 5, кривая 1), а вероятность потерь информации при этом равна $P_{LI} = 0,045$ (рис. 5, кривая 2). Зависимости вероятностей P_{RI} и P_{LI} от крутизны скатов μ нелинейные и при значениях $\mu > 8$ дБ/град рост P_{RI} и уменьшение P_{LI} становятся незначительными.

Изменение ширины главного лепестка ДН $2\phi_{0,5}$ при заданной крутизне μ также значительно влияет на характеристики надежности рассматриваемой радиосистемы. Например, при $2\phi_{0,5} = 3,3^\circ$ и $\mu \approx 7$ дБ/град вероятность получения информации в радиосистеме с главным лепестком ДН антенны в виде трапеции (рис. 5, кривая 3) составляет $P_{RI} \approx 0,91$, а вероятность потерь информации при этом равна $P_{LI} = 0,09$ (рис. 5, кривая 4).

Таким образом, при уменьшении ширины главного лепестка ДН $2\phi_{0,5}$ влияние крутизны μ скатов на параметры P_{RI} и P_{LI} , характеризующие надежность, оказывается более существенным и это необходимо учитывать при проектировании антенн.

Полученные результаты указывают на перспективность использования квазисекторной формы ДН запросчика радиосистемы УВД для повышения ее надежности за счет уменьшения потерь информации из-за провалов в зонах обзора и уменьшения при этом зон потенциального пропуска сигнала.

Заключение

Предложенный подход к модельной оценке и исследованию надежности радиосистемы УВД вероятностями приема и потерь информации из-за провалов в зонах обзора, обусловленных отличием

формы главного лепестка реальной ДН антенны запросчика от идеальной секторной формы, позволяет исследовать влияние формы ДН на надежность радиосистемы. Полученные результаты указывают на возможность повышения надежности радиосистемы УВД за счет использования квазисекторной формы ДН антенны запросчика и оптимизации таких параметров ДН, как крутизна скатов и величина провалов вершины ее главного лепестка. При этом необходимо использовать перспективные способы формирования квазисекторной ДН и контроля ее параметров при проектировании [11, 12].

Список литературы

1. Бычков С. И., Пахолков Г. А., Яковлев В. Н. Радиотехнические системы предупреждения столкновения самолетов. М. : Сов. радио, 1977. 272 с.
2. Грачев В. В., Кейн В. М. Радиотехнические средства управления воздушным движением. М. : Транспорт, 1975. 344 с.
3. Минкович Б. М., Яковлев В. П. Теория синтеза антенн. М. : Сов. радио, 1969. 296 с.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1974. 224 с.
5. Якимов А. Н. Условия формирования секторной диаграммы направленности с минимальным уровнем боковых лепестков // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. 1980. Вып. 4. С. 79–80.
6. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М. : Высш. шк., 1988. 432 с.
7. Якимов А. Н. Оценка влияния антенны на надежность радиосистемы // Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС : межвуз. сб. науч. тр. Пенза : Изд-во Пенз. политехн. ин-та, 1991. Вып. 3. С. 71–74.
8. Бронштейн И. Н., Семендин К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М. : Наука, 1980. 976 с.
9. Покрас А. М., Цирлин В. М., Кудеяров Г. Н. Системы наведения антенн земных станций спутниковой связи. М. : Связь, 1978. 152 с.
10. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В., Круглов В. В. MatLAB 5.3.1 с пакетами расширений / под ред. В. П. Дьяконова. М. : Нолидж, 2001. 880 с.
11. Якимов А. Н. Методы определения параметров при расчете диаграммы направленности антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 74–75.
12. Якимов А. Н. Универсальная модель излучения микроволновой антенны // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 5–12.

References

1. Bychkov S.I., Pakholkov G.A., Yakovlev V.N. *Radiotekhnicheskiye sistemy preduprezhdeniya stolknoveniya samoletov = Radio engineering systems for aircraft collision prevention*. Moscow: Sov. radio, 1977:272. (In Russ.)
2. Grachev V.V., Keyn V.M. *Radiotekhnicheskiye sredstva upravleniya vozдушnym dvizheniyem = Radio engineering means of air traffic control*. Moscow: Transport, 1975:344. (In Russ.)
3. Minkovich B.M., Yakovlev V.P. *Teoriya sinteza antenn = Theory of antenna synthesis*. Moscow: Sov. radio, 1969:296. (In Russ.)
4. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach = Methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Nauka, 1974:224. (In Russ.)
5. Yakimov A.N. Conditions for the formation of a sectoral directional pattern with a minimum level of side lobes. *Voprosy radioelektroniki. Seriya obshchetekhnicheskaya = Issues of radio electronics. The series is general technical*. 1980;(4):79–80. (In Russ.)
6. Sazonov D.M. *Antenny i ustroystva SVCH = Antennas and microwave devices*. Moscow: Vyssh. shk., 1988:432. (In Russ.)
7. Yakimov A.N. Evaluation of the antenna's influence on the reliability of the radio system. *Tsifrovyye modeli v proyektirovani i proizvodstve RES: mezhvuz. sb. nauch. tr. = Digital models in the design and production of thermal power plants : interuniversity collection of scientific papers*. Penza: Izd-vo Penz. politekhn. in-ta, 1991;(3):71–74. (In Russ.)
8. Bronshteyn I.N., Semendyayev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov = Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions*. Moscow: Nauka, 1980:976. (In Russ.)
9. Pokras A.M., Tsirlin V.M., Kudeyarov G.N. *Sistemy navedeniya antenn zemnykh stantsiy sputnikovoy svyazi = Antenna guidance systems for Earth stations of satellite communications*. Moscow: Svyaz', 1978:152. (In Russ.)
10. D'yakonov V.P., Abramenkova I.V., Kruglov V.V. *MatLAB 5.3.1 s paketami rasshireniy = MatLAB 5.3.1 with extension packages*. Moscow: Nolidzh, 2001:880. (In Russ.)
11. Yakimov A.N. Methods for determining parameters when calculating the antenna radiation pattern. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;1:74–75. (In Russ.)
12. Yakimov A.N. Universal model of microwave antenna radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):5–12. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Николаевич Якимов

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

Aleksandr N. Yakimov

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 21.07.2025

Поступила после рецензирования/Revised 25.08.2025

Принята к публикации/Accepted 15.09.2025

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ НА НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

А. А. Адамова¹, А. И. Чен², А. В. Апатенко³, К. В. Селиванов⁴

^{1, 2, 3, 4} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия
¹ arinaadamova75@gmail.com, ² chen3sasha@mail.ru, ³ lexap731@gmail.com, ⁴ selivanov_kv@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Рассматриваются методы и стратегии улучшения технологичности изделий специальной техники. Материалы и методы. Анализируются ключевые аспекты проектирования и производства, включая выбор компонентов, механический монтаж, автоматизацию операций контроля и настройки, а также применение прогрессивных методов формообразования. Особое внимание уделяется совершенствованию характеристик изделия для повышения эффективности, снижения затрат и улучшения качества конечного продукта. Результаты и выводы. Результаты исследования подчеркивают важность интеграции современных технологий и подходов для достижения конкурентоспособности на рынке.

Ключевые слова: технологичность изделий, специальная техника, методы проектирования, производственные стратегии, выбор компонентов, механический монтаж, автоматизация контроля, настройка операций, прогрессивные методы формообразования, качество конечного продукта, современные технологии

Для цитирования: Адамова А. А., Чен А. И., Апатенко А. В., Селиванов К. В. Анализ влияния технологичности на надежность и качество изделий специальной техники // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 91–100. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-9

ANALYSIS OF THE IMPACT OF MANUFACTURABILITY ON THE RELIABILITY AND QUALITY OF SPECIAL EQUIPMENT PRODUCTS

A.A. Adamova¹, A.I. Chen², A.V. Apatenko³, K.V. Selivanov⁴

^{1, 2, 3, 4} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
¹ arinaadamova75@gmail.com, ² chen3sasha@mail.ru, ³ lexap731@gmail.com, ⁴ selivanov_kv@mail.ru

Abstract. Background. The paper discusses methods and strategies for improving the manufacturability of special equipment products. **Materials and methods.** Key aspects of design and production are analyzed, including component selection, mechanical installation, automation of control and adjustment operations, as well as the use of advanced shaping methods. Special attention is paid to improving product characteristics to increase efficiency, reduce costs and improve the quality of the final product. **Results and conclusions.** The results of the study emphasize the importance of integrating modern technologies and approaches to achieve market competitiveness.

Keywords: processability of products, special equipment, design methods, production strategies, component selection, mechanical installation, automation of control, adjustment of operations, advanced shaping methods, quality of the final product, modern technologies

For citation: Adamova A.A., Chen A.I., Apatenko A.V., Selivanov K.V. Analysis of the impact of manufacturability on the reliability and quality of special equipment products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(3):91–100. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-9

Введение

В условиях быстрого технологического прогресса и глобальной конкуренции производители сталкиваются с необходимостью постоянного улучшения характеристик своей продукции. Одним из ключевых факторов, определяющих конкурентоспособность производства, является технологичность конструкции изделия.

Технологичность как важный показатель отражает совокупность свойств, которые определяют пригодность конструкции для эффективного изготовления, сборки, контроля, эксплуатации и утилизации при минимальных затратах. Высокий уровень технологичности способствует снижению себестоимости, повышению производительности, уменьшению вероятности брака и, как следствие, улучшению качества и надежности изделий [1–3].

Проблема повышения технологичности особенно актуальна в контексте разработки и производства специальной техники, функционирующей в условиях высоких нагрузок, повышенной ответственности и ограниченных ресурсов. Эта задача приобретает особое значение в условиях специальной военной операции (СВО), где устойчивость и надежность техники напрямую влияют на эффективность выполнения боевых задач [4, 5].

Вопрос технологичности становится особенно важным в аспекте логистики и полевого ремонта: чем выше технологичность, тем проще и быстрее можно восстановить технику, что снижает потери и увеличивает боеспособность. Таким образом, технологичность выступает ключевым фактором, влияющим на устойчивость систем жизнеобеспечения, связи и навигации на поле боя [4, 6].

В ходе Второй мировой войны одним из самых успешных образцов специальной техники стал танк Т-34, который продемонстрировал выдающиеся характеристики технологичности. Разработанный в конце 1930-х гг. Т-34 стал символом советской бронетанковой мощи и сыграл ключевую роль в ходе Великой Отечественной войны.

Технологичность танка Т-34 проявлялась в его конструктивных особенностях, которые обеспечивали высокую надежность и боевую эффективность. Одним из значительных факторов, способствовавших его успеху, было улучшение проектирования, что позволило создать танк с мощным вооружением, хорошей броневой защитой и высокой маневренностью. Кроме того, танк Т-34 отличался высокой производственной технологичностью, что позволяло быстро наращивать его выпуск. Это стало возможным благодаря использованию новых методов формообразования и механизации процессов сборки, что в свою очередь способствовало снижению затрат на производство и повышению качества конечного продукта [7, 8].

Несмотря на существующее количество исследований, в современной научной и практической среде сохраняется потребность в более гибких и адаптивных методах оценки технологичности, которые учитывают многофакторную специфику изделий и условия их применения [5, 6, 9].

Цель данной работы заключается в выявлении и формализации эффективных стратегий оценки и повышения коэффициента технологичности, что обеспечит улучшение качественных характеристик и надежности изделий, включая специальную технику, в условиях современных вызовов и ограничений [1, 4].

Анализ технологичности и методы отработки изделий

Коэффициент технологичности представляет собой показатель, который отражает уровень удобства и экономичности производства изделия, включая печатные платы (ПП). Он демонстрирует, насколько легко, быстро и недорого можно изготовить, протестировать и собрать печатную плату без ущерба для качества [10].

Определение коэффициента технологичности осуществляется с учетом множества факторов, включая производственные затраты, количество операций и сложность сборки. Вопросам автоматизации управления технологичностью посвящен целый ряд работ [6, 7, 10–14].

На основании системного анализа выделяют четыре основных класса методов управления технологичностью изделий:

- методы разработки общих рекомендаций и требований;
- методы качественной оценки на основе анализа конструктивных особенностей;
- методы количественной оценки, включающие расчет коэффициентов;
- комплексные методы, которые объединяют качественные и количественные подходы (рис. 1).



Рис. 1. Классификация методов управления технологичностью

Метод экспертной панели предполагает пошаговое формирование группы специалистов, оценку значимости показателей и расчет весов коэффициентов. Ключевые этапы включают:

- отбор экспертов по опыту, образованию и публикациям;
- проведение тестирования на профессиональную пригодность;
- составление панели и анкетирование по шкале от 0 до 10;
- формирование матрицы парных сравнений и расчет весов;
- вычисление интегрального коэффициента технологичности как взвешенной суммы частных показателей.

В анкетах экспертной панели специалисты оценивают актуальность учета определенного параметра на текущий момент. В качестве параметров были выбраны базовые показатели технологичности для электронных устройств в соответствии с ОСТ 4ГО.091.219-81 (табл. 1).

Таблица 1

Базовые показатели технологичности

Базовый показатель технологичности	Обозначение и формула показателя технологичности	Весовой коэффициент φ_i
1. Коэффициент использования микросхем и микросборок в блоке	$K_{\text{ИМС}} = H_{\text{МС}} / H_{\text{ЭРЭ}}$, где $H_{\text{МС}}$ – общее количество микросхем и микросборок; $H_{\text{ЭРЭ}}$ – общее количество электронных радиоэлементов (ЭРЭ)	1,0
2. Коэффициент автоматизации и механизации монтажа изделия	$K_{\text{ам}} = H_{\text{ам}} / H_m$, где $H_{\text{ам}}$ – количество монтажных соединений, осуществляемых механическим способом; H_m – общее количество монтажных соединений	1,0
3. Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ к монтажу	$K_{\text{МП ЭРЭ}} = H_{\text{МП ЭРЭ}} / H_{\text{ЭРЭ}}$, где $H_{\text{МП ЭРЭ}}$ – количество ЭРЭ, подготовка которых к монтажу осуществляется механизированным способом	0,75
4. Коэффициент автоматизации и механизации операций контроля и настройки	$K_{\text{МКН}} = H_{\text{МКН}} / H_{\text{КН}}$, где $H_{\text{МКН}}$ – количество операций контроля и настройки, осуществляемых автоматизированным способом; $H_{\text{КН}}$ – общее количество операций контроля и настройки	0,5
5. Коэффициент повторяемости ЭРЭ	$K_{\text{п ЭРЭ}} = 1 - H_{\text{т ЭРЭ}} / H_{\text{ЭРЭ}}$, где $H_{\text{т ЭРЭ}}$ – общее количество типоразмеров ЭРЭ в изделии	0,31
6. Коэффициент применяемости ЭРЭ	$K_{\text{пр ЭРЭ}} = 1 - H_{\text{топ ЭРЭ}} / H_{\text{т ЭРЭ}}$, где $H_{\text{топ ЭРЭ}}$ – количество типоразмеров, оригинальных ЭРЭ в изделии	0,187
7. Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	$K_{\Phi} = D_{\text{пр}} / D$, где $D_{\text{пр}}$ – количество деталей, изготовленных прогрессивными методами формообразования; D – общее количество деталей	0,11

Комплексный показатель технологичности конструкции изделия на основе базовых вычисляется следующим образом [1, 2, 4, 15]:

$$K = \sum_{i=1}^7 (K_i \varphi_i) / \sum_{i=1}^7 \varphi_i.$$

Для оценки и обеспечения технологичности конструкций изделий, включая печатные платы, применяются следующие государственные стандарты (ГОСТы):

- ГОСТ 14.201–83. Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования.

Этот стандарт устанавливает основные положения, систему показателей и последовательность работ по обеспечению технологичности конструкций изделий;

- ГОСТ Р 71362–2024. Система технологической подготовки производства. Организация работ по оценке технологичности конструкции изделия.

Стандарт определяет общие требования к организации работ по оценке и методам расчета технологичности изделия на всех стадиях его разработки и производства;

- ГОСТ Р 53432–2009. Платы печатные. Общие технические требования к производству.

Этот стандарт устанавливает требования к техническому уровню производства печатных плат и вводит понятие коэффициента технического уровня (КТУ) предприятия, определяющего категорию производства.

Расчет коэффициента технологичности комплексным методом

Для демонстрации практического применения концепции коэффициента технологичности в данной работе будет проанализировано устройство «Включение освещения при приближении к объекту» (рис. 2). В рамках исследования была создана 3D-модель, которая позволяет наглядно представить конструкцию и функциональные элементы устройства. Также была проведена трассировка, что дало возможность выявить основные факторы, влияющие на эффективность работы устройства. Результаты трассировки продемонстрировали, как различные компоненты взаимодействуют между собой и как их расположение может оказаться на общем коэффициенте технологичности. 3D-модель и результаты трассировки были разработаны с использованием САПР Altium Designer (рис. 3).

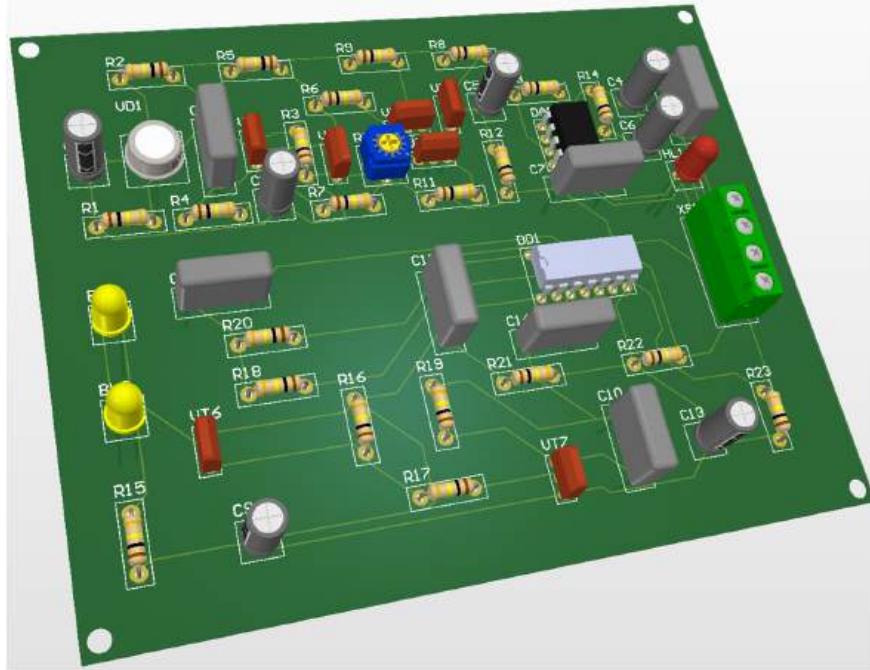


Рис. 2. 3D-вид устройства «Включение освещения при приближении к объекту»

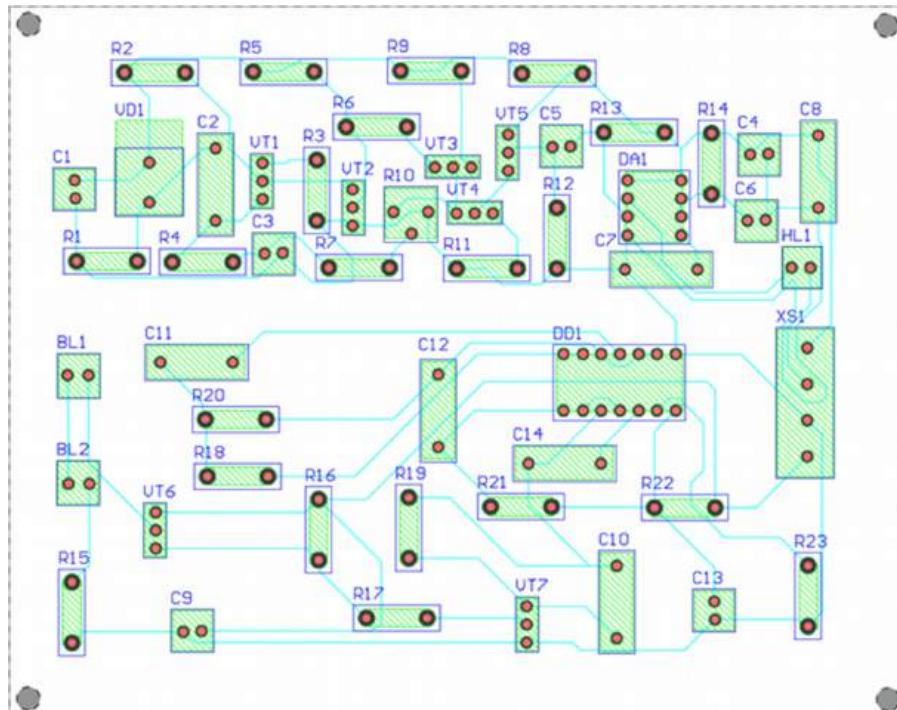


Рис. 3. Трассировка печатной платы устройства «Включение освещения при приближении к объекту»

В данной работе применялся исключительно монтаж компонентов по технологии ТНТ (Through-hole Technology) с односторонней трассировкой. Предполагается, что пайка выполняется вручную, как и установка компонентов. В процессе контроля и настройки выделяются следующие операции: оптический контроль, электрическое тестирование, проверка на короткое замыкание и обрыв, калибровка, а также настройка программного обеспечения. Корпус устройства состоит из таких элементов, как основа, крышка, крепежные детали, оптические компоненты, датчик и изоляционные элементы.

Основа корпуса изготавливается традиционными методами, такими как механическая обработка или сборка из отдельных частей. Крышка создается из отдельных листов материала, которые склеиваются или соединяются другим способом. Крепежные элементы представляют собой стандартные компоненты, которые приобретаются отдельно, как и датчик. Оптические компоненты могут быть изготовлены с использованием различных технологий, включая оптическую обработку. Изоляционные элементы выполнены из резины или других материалов, не требующих сложных методов формообразования [25]. На основе этих данных был рассчитан коэффициент технологичности:

$$K_{\text{имс}} = H_{\text{мс}} / H_{\text{ЭРЭ}} = 2/51 = 0,04;$$

$$K_{\text{ам}} = H_{\text{ам}} / H_{\text{м}} = 4/99 = 0,04;$$

$$K_{\text{МП ЭРЭ}} = H_{\text{МП ЭРЭ}} / H_{\text{ЭРЭ}} = 0/51 = 0;$$

$$K_{\text{МКН}} = H_{\text{МКН}} / H_{\text{КН}} = 0/5 = 0;$$

$$K_{\text{п ЭРЭ}} = 1 - H_{\text{п ЭРЭ}} / H_{\text{ЭРЭ}} = 1 - 10/51 = 0,8;$$

$$K_{\text{пр ЭРЭ}} = 1 - H_{\text{пр ЭРЭ}} / H_{\text{т ЭРЭ}} = 1 - 2/10 = 0,8;$$

$$K_{\phi} = \Delta_{\text{пр}} / \Delta = 0/6 = 0;$$

$$K = \sum_{i=1}^7 (K_i \cdot \varphi_i) / \sum_{i=1}^7 \varphi_i = (0,04 \cdot 1 + 0,04 \cdot 1 + 0 \cdot 0,75 + 0 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0,31 + 0,8 \cdot 0,187 + 0 \cdot 0,11) / (1 + 1 + 0,75 + 0,5 + 0,31 + 0,187 + 0,11) = 0,12.$$

Пересчет коэффициента технологичности, произведя некоторые изменения

Далее были внесены изменения в изделие и пересмотрены условия его производства (рис. 4–6).



Рис. 4. 3D-вид устройства «Включение освещения при приближении к объекту» сверху с учетом изменений

Рис. 5. 3D-вид устройства «Включение освещения при приближении к объекту» снизу с учетом изменений

Некоторые компоненты были заменены на SMD (Surface-Mount Device), а трассировка и монтаж осуществлены с обеих сторон печатной платы. Процессы пайки, установки нескольких компонентов, а также операции контроля и настройки были автоматизированы [7, 12–14]. Основа корпуса и крышка изготавлены с применением 3D-печати. Крепежные и оптические элементы выполнены методом литья [8, 16–25]. На основании этих данных был рассчитан обновленный коэффициент технологичности:

$$K_{\text{имс}} = H_{\text{мс}} / H_{\text{ЭРЭ}} = 2/51 = 0,04;$$

$$K_{\text{ам}} = H_{\text{ам}} / H_{\text{м}} = 30/99 = 0,3;$$

$$K_{\text{мп ЭРЭ}} = H_{\text{мп ЭРЭ}} / H_{\text{ЭРЭ}} = 29/51 = 0,57;$$

$$K_{\text{МКН}} = H_{\text{МКН}} / H_{\text{КН}} = 5/5 = 1;$$

$$K_{\text{П ЭРЭ}} = 1 - H_{\text{П ЭРЭ}} / H_{\text{ЭРЭ}} = 1 - 10/51 = 0,8;$$

$$K_{\text{Пр ЭРЭ}} = 1 - H_{\text{Пр ЭРЭ}} / H_{\text{ЭРЭ}} = 1 - 2/10 = 0,8;$$

$$K_{\phi} = D_{\text{Пр}} / D = 4/6 = 0,67;$$

$$K = \sum_{i=1}^7 (K_i \cdot \varphi_i) / \sum_{i=1}^7 \varphi_i = (0,04 \cdot 1 + 0,3 \cdot 1 + 0,57 \cdot 0,75 + 1 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0,31 + 0,8 \cdot 0,187 + 0,67 \cdot 0,11) / (1 + 1 + 0,75 + 0,5 + 0,31 + 0,187 + 0,11) = 0,45.$$

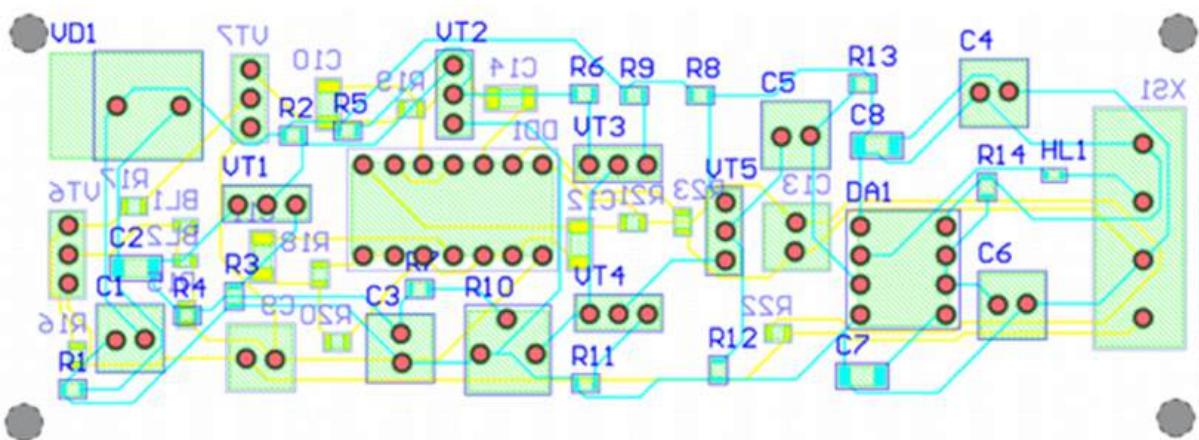


Рис. 6. Трассировка печатной платы устройства «Включение освещения при приближении к объекту» с учетом изменений

Использованы два подхода:

- до улучшений (ручная сборка, низкая автоматизация): $K = 0,12$.
- после улучшений (SMD, 3D-печать): $K = 0,45$.

С учетом незначительных улучшений удалось достичь более компактных размеров устройства, а также повысить коэффициент технологичности, показатели которого теперь соответствуют уровню опытного образца. Это подтверждает эффективность предложенной методики для оценки влияния инженерных решений на технологичность изделия [26, 27].

Заключение

Расчет коэффициента технологичности представляет собой важный этап в оценке эффективности разработки и производства изделия. Этот показатель позволяет не только определить степень сложности изделия, но и усовершенствовать его характеристики для достижения лучших результатов. Учитывая внесенные изменения в конструкцию и технологии производства, полученный коэффициент технологичности демонстрирует положительную динамику, что указывает на повышение эффективности и конкурентоспособности. В соответствии с проведенной работой были сформулированы следующие рекомендации по улучшению коэффициента технологичности:

- использовать преимущественно механический монтаж соединений, включая винты, гайки, шайбы и другие механические крепежные элементы для соединения компонентов и их крепления к корпусу; применять разъемы, обеспечивающие механический и электрический контакт, а также защимы и клипсы для фиксации компонентов;
- при большом количестве компонентов оптимальным решением для замены будут микросхемы или микросборки, так как они представляют собой более сложные устройства, упрощающие проектирование и компоновку платы, а также увеличивающие функциональные возможности;
- следует выбирать SMD-компоненты, чипы и модули или пакеты с выводами, такие как QFP и BGA, поскольку они могут устанавливаться с помощью автоматизированных машин, что снижает вероятность ошибок, связанных с неправильной установкой компонентов;
- автоматизировать операции контроля и настройки электрических параметров для выявления дефектов на ранних стадиях и сокращения времени, необходимого для проверки и настройки;

– минимизировать разнообразие компонентов, так как это может усложнить процесс проектирования печатной платы;

– уменьшить количество оригинальных ЭРЭ в изделии, поскольку такие компоненты также усложняют проектирование из-за их уникальных размеров и форм;

– применять прогрессивные методы формообразования деталей, так как они обеспечивают более высокое качество и точность, сокращают время и затраты на производство и обладают достаточной гибкостью.

Таким образом, применение всех перечисленных рекомендаций позволит существенно повысить коэффициент технологичности, а также общую эффективность разработки и производства изделия, что приведет к созданию более качественного и надежного продукта, соответствующего современным стандартам.

Список литературы

1. Адамов А. П., Адамова А. А., Власов А. И. Дифференциальные коэффициенты оценки технологичности электронных средств и их применение при структурно-функциональном моделировании производственных систем // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2015. № 5. С. 109–123.
2. Адамова А. А., Адамов А. П., Шахнов В. А. Методика оценки технологичности электронных изделий на этапах проектирования и производства // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 352–356.
3. Адамов А. П., Адамова А. А. Семантический анализ перспективных изделий микро- и наноэлектроники с точки зрения увеличения ключевых показателей качества и технологичности // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 94–101.
4. Адамов А. П., Адамова А. А., Темиров А. Т. Методика системного конструкторско-технологического проектирования изделий электронной техники с учетом требований концепции «Индустрия 4.0» // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 2. С. 310–317.
5. Адамова А. А. О проблеме коэффициентных методов оценки технологичности // Цифровая трансформация в энергетике : сб. тр. конф. Тамбов, 2025. С. 3–5.
6. Vlasov A. I., Shakhnov V. A. Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components // Lecture Notes in Information Systems and Organisation. 2021. Р. 57–65.
7. Селиванов К. В., Волков Г. А. Применение аддитивных технологий в производстве электронной аппаратуры // Датчики и системы. 2023. № 5. С. 27–34.
8. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 85–95.
9. Власов А. И., Карпунин А. А., Курышев Р. Э. Визуальное моделирование smart-технологий проектного управления // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 64–70.
10. Vlasov A. I., Berdyugina O. N., Krivoshein A. I. Technological platform for innovative social infrastructure development on basis of smart machines and principles of internet of things // Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018 : proceedings. 2018. Р. 8570062.
11. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Методы формализации когнитивной графики и визуальных моделей с использованием схем XML // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2021. № 1. С. 51–77.
12. Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Классификации наноматериалов для традиционных и аддитивных технологий в системе транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 70–77.
13. Власов А. И., Гараев А. В., Захарова В. О. [и др.]. Методика профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 95–110.
14. Захарова В. О., Селиванов К. В. Перспективы аддитивной профилизации беспилотных летательных аппаратов // Современные технологии научного приборостроения и информационно-измерительных систем : тр. Междунар. науч.-техн. конф. М., 2023. С. 139.
15. Каршов Р. С. Расчет коэффициента технологичности платы согласования // Проблемы современной науки и образования. 2018. № 6. С. 33–36.
16. Арабов Д. И., Верясова А. Ю., Гриднев В. Н. Комплексное макетирование узлов вычислительной техники с использованием инфраструктуры цифрового производства (FAB-LAB) в условиях сквозного обеспечения качества // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 1. С. 189–192.
17. Арабов Д. И., Власов А. И., Гриднев В. Н. [и др.]. FAB-LAB-технологии быстрого прототипирования изделий электронной техники // Современные научные исследования: методология, теория, практика : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск : Центр содействия развитию научных исследований, 2014. С. 162–179.

18. Vlasov A. I., Juravleva L. V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2373. P. 072035.
19. Sokolov Yu. A., Pavlushin N. V., Kondrat'ev S. Yu. New additive technologies based on ion beams // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 12. P. 1012–1016.
20. Sleptsov V. V., Savkin A. V., Trunova E. A. [et al.]. Electrospark dispersion in nanopowder production for additive technologies // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39. P. 133–136.
21. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis // Chem-CatChem. 2018. Vol. 10. P. 1512–1525.
22. Ramji Pandey. Photopolymers in 3D printing applications // Arcada. Degree Thesis Plastics Technology. 2014. № 51.
23. Strielkowski W., Vlasov A., Selivanov K. [et al.]. Prospects and challenges of the machine learning and data-driven methods for the predictive analysis of power systems: a review // Energies. 2023. Vol. 16, № 10. P. 4025.
24. Echeistov V. V., Krivoshein A. I., Shakhnov V. A. [et al.]. An information system of predictive maintenance analytical support of industrial equipment // Applied Engineering Science. 2018. Vol. 16, № 4. P. 515–522.
25. Власов А. И., Григорьев П. В., Кривошеин А. И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2. С. 26–35.
26. Адамова А. А. Экспертные методы управления технологичностью в приборостроении // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Тамбов, 2024. С. 127–129.
27. Адамова А. А. Интеллектуальные методы системного управления технологичностью // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2024. Т. 1. С. 120–127.

References

1. Adamov A.P., Adamova A.A., Vlasov A.I. Differential coefficients for evaluating the manufacturability of electronic devices and their application in structural and functional modeling of production systems. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Priborostroyeniye = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser.: Instrument Engineering.* 2015;(5):109–123. (In Russ.)
2. Adamova A.A., Adamov A.P., Shakhnov V.A. Methodology for assessing the manufacturability of electronic products at the design and production stages. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2015;(2):352–356. (In Russ.)
3. Adamov A.P., Adamova A.A. Semantic analysis of promising micro- and nanoelectronics products in terms of increasing key quality and manufacturability indicators. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2017;(3):94–101. (In Russ.)
4. Adamov A.P., Adamova A.A., Temirov A.T. Methodology of system design and technological design of electronic equipment products taking into account the requirements of the concept "Industry 4.0". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2020;2:310–317. (In Russ.)
5. Adamova A.A. On the problem of coefficient methods for assessing manufacturability. *Tsifrovaya transformatsiya v energetike: sb. tr. konf. = Digital transformation in the energy sector : proceedings of the conference.* Tambov, 2025:3–5. (In Russ.)
6. Vlasov A.I., Shakhnov V.A. Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components. *Lecture Notes in Information Systems and Organisation.* 2021:57–65.
7. Selivanov K.V., Volkov G.A. Application of additive technologies in the manufacture of electronic equipment. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems.* 2023;(5):27–34. (In Russ.)
8. Perevertov V.P., Andronchев I.K., Yurkov N.K. Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(2):85–95. (In Russ.)
9. Vlasov A.I., Karpunin A.A., Kuryshev R.E. Visual modeling of smart project management technologies. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2020;1:64–70. (In Russ.)
10. Vlasov A.I., Berdyugina O.N., Krivoshein A.I. Technological platform for innovative social infrastructure development on basis of smart machines and principles of internet of things. *Global Smart Industry Conference, GlosIC 2018: proceedings.* 2018:8570062.
11. Vlasov A.I., Zhuravleva L.V., Kazakov V.V. Methods of formalization of cognitive graphics and visual models using XML schemas. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Priborostroyeniye = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser.: Instrument Engineering.* 2021;(1):51–77. (In Russ.)
12. Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. Classifications of nanomaterials for traditional and additive technologies in the system of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):70–77. (In Russ.)

13. Vlasov A.I., Garayev A.V., Zakharova V.O. et al. Methodology of profiling unmanned aerial vehicles based on additive technologies. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(4):95–110. (In Russ.)
14. Zakharova V.O., Selivanov K.V. Prospects of additive profiling of unmanned aerial vehicles. *Sovremennyye tekhnologii nauchnogo priborostrоeniya i informatsionno-izmeritel'nykh sistem: tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* = *Modern technologies of scientific instrumentation and information and measuring systems : proceedings of the International scientific and technical conf.* Moscow, 2023:139. (In Russ.)
15. Karshov R.S. Calculation of the coefficient of manufacturability of the matching board. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya = Problems of modern science and education*. 2018;(6):33–36. (In Russ.)
16. Arabov D.I., Veryasova A.Yu., Gridnev V.N. Complex prototyping of computer technology nodes using the digital production infrastructure (FAB-LAB) in conditions of end-to-end quality assurance. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;1:189–192. (In Russ.)
17. Arabov D.I., Vlasov A.I., Gridnev V.N. et al. FAB-LAB technologies for rapid prototyping of electronic equipment products. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya: metodologiya, teoriya, praktika: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* = *Modern scientific research: methodology, theory, practice : proceedings of the II International scientific and practical conference*. Novosibirsk: Tsentr sodeystviya razvitiyu nauchnykh issledovanii, 2014:162–179. (In Russ.)
18. Vlasov A.I., Juravleva L.V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2373:072035.
19. Sokolov Yu.A., Pavlushin N.V., Kondrat'ev S.Yu. New additive technologies based on ion beams. *Russian Engineering Research*. 2016;12:1012–1016.
20. Sleptsov V.V., Savkin A.V., Trunova E.A. et al. Electrospark dispersion in nanopowder production for additive technologies. *Russian Engineering Research*. 2019;39:133–136.
21. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis. *Chem-CatChem*. 2018;10:1512–1525.
22. Ramji Pandey. Photopolymers in 3D printing applications. *Arcada. Degree Thesis Plastics Technology*. 2014;(51).
23. Strielkowski W., Vlasov A., Selivanov K. et al. Prospects and challenges of the machine learning and data-driven methods for the predictive analysis of power systems: a review. *Energies*. 2023;16(10):4025.
24. Echeistov V.V., Krivoshein A.I., Shakhnov V.A. et al. An information system of predictive maintenance analytical support of industrial equipment. *Applied Engineering Science*. 2018;16(4):515–522.
25. Vlasov A.I., Grigor'yev P.V., Krivoshein A.I. A model of predictive maintenance of equipment using wireless sensor networks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(2):26–35. (In Russ.)
26. Adamova A.A. Expert methods of control of manufacturability in instrument engineering. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: sb. tr. IX Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem = Radioelectronics. Problems and prospects of development : Proceedings of the IX All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Tambov, 2024:127–129. (In Russ.)
27. Adamova A.A. Intelligent methods of system technology management. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2024;1:120–127. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Арина Александровна Адамова
 кандидат технических наук, доцент,
 доцент кафедры проектирования и технологии
 производства электронной аппаратуры,
 Московский государственный технический
 университет имени Н. Э. Баумана
 (национальный университет)
 (Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1)
 E-mail: arinaadamova75@gmail.com

Александра Ир-Мановна Чен
 бакалавр,
 Московский государственный технический
 университет имени Н. Э. Баумана
 (Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1)
 E-mail: chen3sasha@mail.ru

Arina A. Adamova
 Candidate of technical sciences, associate professor,
 associate professor of the sub-department of design
 and production technology of electronic equipment,
 Bauman Moscow State Technical University
 (build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Aleksandra Ir-M. Chen
 Bachelor,
 Bauman Moscow State Technical University
 (build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Алексей Владимирович Апатенко

бакалавр,

Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1)
E-mail: lexap731@gmail.com

Aleksey V. Apatenko

Bachelor,

Bauman Moscow State Technical University
(build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Кирилл Владимирович Селиванов

кандидат технических наук, доцент кафедры
проектирования и технологии производства
электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1)
E-mail: selivanov_kv@mail.ru

Kirill V. Selivanov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department of design
and production technology of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 15.05.2025

Принята к публикации/Accepted 18.06.2025

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРУПНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Е. А. Бадеева¹, В. А. Бадеев², Т. И. Мурашкина³

^{1, 2, 3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ badeeva_elena@mail.ru, ² vladbadeev4464@gmail.com, ³ timurashkina@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Мониторинг технического состояния ответственных и потенциально опасных крупных гражданских и специальных сооружений, таких как атомные электростанции, трубопроводы, мосты и многие другие, с целью определения их работоспособности и безопасной эксплуатации, предупреждения чрезвычайных ситуаций является важной научно-технической задачей. Система мониторинга технического состояния крупных объектов представляет собой совокупность технологий и инструментов, предназначенных для визуального и инструментального наблюдения за техническим состоянием конструкций для своевременного предупреждения негативных последствий путем выявления изменений и прогнозирования прочности и надежности элементов. Цель работы – доказать искробезопасность волоконно-оптической системы мониторинга параметров напряженно-деформированного состояния и положения ключевых элементов конструкции во время эксплуатации. Поставлена задача улучшения эксплуатационных характеристик данных систем в условиях воздействия внешних агрессивных влияющих факторов, а именно взрывоопасной среды. **Материалы и методы.** Основным подходом для достижения поставленной цели является энергетический расчет, доказывающий искробезопасность волоконно-оптической системы с учетом критериев искробезопасности, приведенных в ряде научно-технических источников. Для решения поставленной задачи предлагается волоконно-оптическая система мониторинга технического состояния крупных сооружений, включающая датчики температуры, давления, угла наклона и т.п., обеспечивающая оперативную оценку параметров. **Результаты.** Исследованы параметры искробезопасности волоконно-оптических датчиков различных физических величин, входящих в состав системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупных сооружений, эксплуатируемых в условиях возможной искровзрывопожароопасности. Доказано, что для обеспечения безопасной эксплуатации крупных гражданских сооружений максимальный допустимый уровень оптического сигнала составляет 10 мВт. Для этого предложено унифицированное схемно-конструктивное исполнение волоконно-оптических датчиков, у которых уровень оптических сигналов ниже данного значения. **Выводы.** Энергетический расчет оптической системы волоконно-оптических датчиков с открытым оптическим каналом, используемых для систем мониторинга технического состояния крупных сооружений, доказал их абсолютную искробезопасность, учитывая критерии искробезопасности среды измерения.

Ключевые слова: система мониторинга, техническое состояние, крупное сооружение, проектирование, волоконно-оптический датчик, искробезопасность, уровень оптического сигнала, энергетический расчет, открытый оптический канал

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00595, <https://rscf.ru/project/24-29-00595/>

Для цитирования: Бадеева Е. А., Бадеев В. А., Мурашкина Т. И. Проектирование искробезопасных волоконно-оптических датчиков для систем мониторинга технического состояния крупных сооружений // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 101–109. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-10

DESIGNING INTRINSICALLY SAFE FIBER-OPTIC SENSORS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF LARGE STRUCTURES

E.A. Badeeva¹, V.A. Badeev², T.I. Murashkina³

^{1, 2, 3} Penza State University, Penza, Russia

¹ badeeva_elena@mail.ru, ² vladbadeev4464@gmail.com, ³ timurashkina@mail.ru

Abstract. Background. Monitoring the technical condition of responsible and potentially dangerous large civil and special structures, such as nuclear power plants, pipelines, bridges, and many others, in order to determine their operability and safe operation, and to prevent emergencies is an important scientific and technical task. The monitoring

system for the technical condition of large facilities is a set of technologies and tools designed for visual and instrumental monitoring of the technical condition of structures in order to prevent negative consequences in a timely manner by identifying changes and predicting strength and the reliability of the elements. The purpose of the work is to prove the intrinsic safety of a fiber-optic monitoring system for the parameters of the stress-strain state and the position of key structural elements during operation. The task is to improve the operational characteristics of these systems under the influence of external aggressive influencing factors, namely an explosive environment. *Materials and methods.* The main approach to achieve this goal is an energy calculation that proves the intrinsic safety of a fiber-optic system, taking into account the intrinsic safety criteria given in a number of scientific and technical sources. To solve this problem, a fiber-optic monitoring system for the technical condition of large structures is proposed, including sensors for temperature, pressure, tilt angle, etc., providing an operational assessment of the parameters. *Results.* The intrinsic safety parameters of fiber-optic sensors of various physical quantities included in the monitoring system for the stress-strain state of large structures operating under conditions of possible spark and explosion hazard have been studied. It is proved that to ensure the safe operation of large civil structures, the maximum allowable optical signal level is 10 MW. For this purpose, a unified circuit design of fiber-optic sensors is proposed, in which the optical signal level is lower than this value. *Conclusions.* The energy calculation of the optical system of fiber-optic sensors with an open optical channel used for monitoring the technical condition of large structures has proved their absolute intrinsic safety, taking into account the intrinsic safety criteria of the measuring medium.

Keywords: monitoring system, technical condition, large structure, design, fiber-optic sensor, intrinsic safety, optical signal level, energy calculation, open optical channel

Financing: the research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00595, <https://rscf.ru/project/24-29-00595>

For citation: Badeeva E.A., Badeev V.A., Murashkina T.I. Designing intrinsically safe fiber-optic sensors for monitoring the technical condition of large structures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):101–109. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-10

Введение

Мониторинг технического состояния ответственных и потенциально опасных гражданских и специальных сооружений, таких как атомные электростанции, трубопроводы, мосты и другие, с целью определения их работоспособности и безопасной эксплуатации, обеспечивается постоянным автоматическим сбором и регистрацией данных об объекте с помощью специализированного измерительного дистанционного оборудования [1–7]¹.

Создание безопасных условий эксплуатации и предупреждение аварийных ситуаций на крупных объектах гражданского и специального строительного назначения достигается посредством точной технической диагностики их текущего состояния. В ходе мониторинга контролируются различные физические величины (температура, угол наклона, деформация, давление и т.п.) и процессы как непосредственно в конструкциях объектов, так и в грунте [1–6]. Датчики физических величин систем мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) и положения ключевых элементов конструкции являются первоисточниками, сообщающими о возникших негативных изменениях конструкций сооружений.

Мониторинг НДС и положения ключевых элементов конструкции потенциально опасных крупных гражданских и специальных объектов можно проводить с помощью современных перспективных волоконно-оптических датчиков (ВОД). В последние годы все большее внимание уделяется волоконно-оптическим системам передачи данных и замене устаревших искропожароопасных электрических цепей и элементов. В состав волоконно-оптической системы мониторинга (ВОСМ) технического состояния крупных сооружений могут входить измерительные приборы – датчики давления, деформаций, температуры, линейных перемещений, угла наклона, а также система термометрии, анализаторы сигналов, волоконно-оптический мультиплексор и т.п. [7–9].

В число основных требований, предъявляемых к ВОСМ технического состояния крупных сооружений гражданского и стратегического назначения, входят показатели безотказной работы, приближенной к единице, прочности конструкции при долговечности составляющей 25...60 лет [9, 10]. Конструктивные особенности размещения оптического оборудования допускают его нахождение в зоне потенциально взрывоопасной или в непосредственной близи от нее, при этом генерируемое оборудованием излучение может распространяться в пределах взрывоопасной среды [9, 10]. А определенные типы излучения могут воспламенить взрывоопасную среду [9, 10]².

¹ ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

² ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006. Взрывоопасные среды. Часть 28. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение (IEC 60079-28:2006, IDT).

При эксплуатации крупных сооружений присутствует риск воспламенения горючих смесей воздуха с окислителем, обусловленных наличием широкого спектра потенциальных источников инициирования горения, к которым относятся пламя, электрические разряды, термическое воздействие, расплавленные, ударные волны и т.п. Вышеуказанные процессы приводят к повышению температуры части горючей смеси, инициируя реакции горения в соседних слоях, приводя к распространению пламени по всему объему смеси [10].

Цель работы – доказать искробезопасность ВОСМ параметров НДС и положения ключевых элементов конструкции во время эксплуатации.

Материалы и методы

Основным подходом для достижения поставленной цели является энергетический расчет, доказывающий искробезопасность ВОСМ с учетом критериев искробезопасности, приведенных в ряде научно-технических источников, отдельные положения которых приведены ниже. Согласно п. 3.14 ГОСТ 31937–2024, «мониторинг технического состояния уникальных зданий (сооружений) – это система наблюдения и контроля, проводимая по определенной программе для обеспечения безопасного функционирования уникальных зданий или сооружений за счет своевременного обнаружения на ранней стадии тенденции негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов оснований или крена, которые могут повлечь за собой переход объектов в ограниченно-работоспособное или в аварийное состояние, а также для получения необходимых данных для разработки мероприятий по устранению выявленных негативных явлений и процессов»¹.

На основании п. 3.22 ГОСТ 31937–2024 «система мониторинга инженерно-технического обеспечения – это совокупность технических и программных средств, позволяющая осуществлять сбор и обработку информации о различных параметрах работы системы инженерно-технического обеспечения здания (сооружения) в целях контроля возникновения в ней дестабилизирующих факторов и передачи сообщений о возникновении или прогнозе аварийных ситуаций собственнику или иному лицу, определенному собственником»².

В соответствии с п. 4.9 ГОСТ Р 22.1.12–2005 «системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений подлежат обязательной установке на потенциально опасных, особо опасных, технически сложных и уникальных объектах, таких как ядерно- и/или радиационно-опасные объекты (атомные электростанции, исследовательские реакторы, предприятия топливного цикла, хранилища временного и долговременного хранения ядерного топлива и радиоактивных отходов); объекты космической инфраструктуры; аэропорты и объекты их инфраструктуры; объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования; магистральные газо-, нефте- и продуктопроводы и многие другие»³.

По ГОСТ 31610.11 искробезопасность – это «вид взрывозащиты, основанный на ограничении электрической энергии в оборудовании и соединительной проводке, которые подвергаются воздействию потенциально взрывоопасной среды, до значения ниже уровня, вызывающего воспламенение от искрения или нагрева»⁴.

Система мониторинга технического состояния крупных объектов – это совокупность технологий и инструментов, предназначенных для визуального и инструментального наблюдения за техническим состоянием конструкций с целью своевременного выявления изменений, оценки и прогноза прочности и надежности элементов, предупреждения и устранения последствий негативных процессов.

Результаты

Согласно ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006, искробезопасное оптическое излучение – это «видимое или инфракрасное излучение, которое неспособно в нормальных условиях или указанных условиях неисправности приводить к образованию энергии, достаточной для воспламенения

¹ ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

² Там же.

³ ГОСТ Р 22.1.12–2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования.

⁴ ГОСТ 31610.11–2014. (IEC 60079-11:2011). Взрывоопасные среды. Часть 11. Оборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «i» (IEC 60079-11:2011, MOD).

указанной опасной»¹. Поэтому подход к безопасности основывается на ограничении интенсивности пучка оптического излучения. Для этого разработаны схемно-конструктивные исполнения ВОД с открытым оптическим каналом (ООК) [7, 8, 11, 12], унифицированная структурная схема которых приведена на рис. 1 и в которых в качестве источников излучения используются инфракрасные светодиоды малой мощности и согласованные с ними по спектру фотодиоды, что обеспечивает возможность расположения их во взрывоопасной зоне.

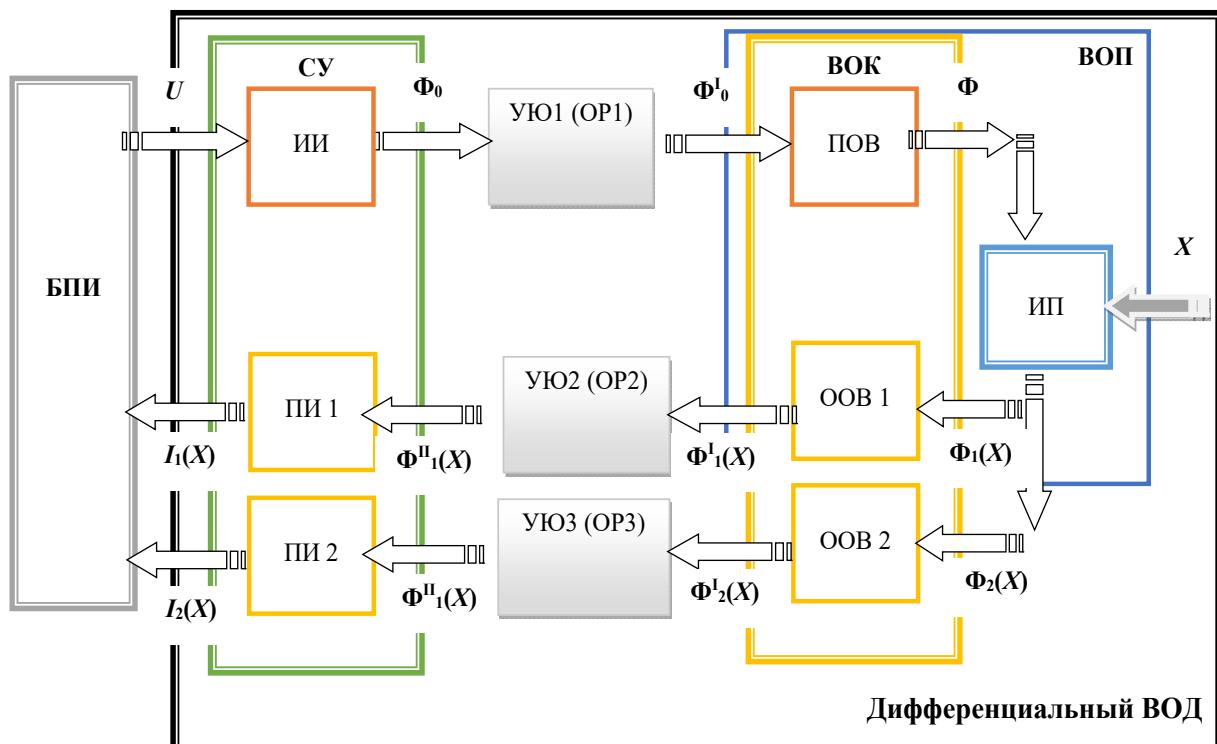


Рис. 1. Унифицированная структурная схема ВОД, в которых в качестве источников излучения используются инфракрасные светодиоды малой мощности и согласованные с ними по спектру фотодиоды:
 БПИ – блок преобразования информации; ВОД – волоконно-оптический датчик;
 СУ – согласующее устройство: ИИ – источник излучения, ПИ – приемник излучения;
 УЮ – узел юстировки (OP – оптический разъем); ВОП – волоконно-оптический измерительный преобразователь; ВОК – волоконно-оптический кабель (ПОВ – подводящее оптическое волокно, ООВ – отводящее оптическое волокно); ИП – измерительный преобразователь

Необходимым условием оценки искробезопасности оптического излучения является проведение энергетического расчета тракта волоконно-оптических элементов и средств измерений, которые входят в состав измерительной системы и располагаются в зоне, где может произойти воспламенение элементов. ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006 регламентирует четыре механизма воспламенения (рис. 2). В конструируемых ВОД используется инфракрасное излучение, и источником излучения выступают светодиоды малой мощности, поэтому с учетом предписаний ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006 два последних механизма воспламенения не будут рассматриваться и наиболее вероятным механизмом воспламенения может выступать первый. Обоснование соответствия системы мониторинга на основе ВОД нормативным требованиям взрывобезопасности являются критерии по уровню мощности оптического излучения, которые широко освещены в исследованиях [9–13]².

¹ ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006. Взрывоопасные среды. Часть 28. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение (IEC 60079-28:2006, IDT).

² ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006. Взрывоопасные среды. Часть 28. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение (IEC 60079-28:2006, IDT); ГОСТ Р 22.1.12–2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования; ГОСТ 31610.11–2014. (IEC 60079-11:2011). Взрывоопасные среды. Часть 11. Оборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «i» (IEC 60079-11:2011, MOD).

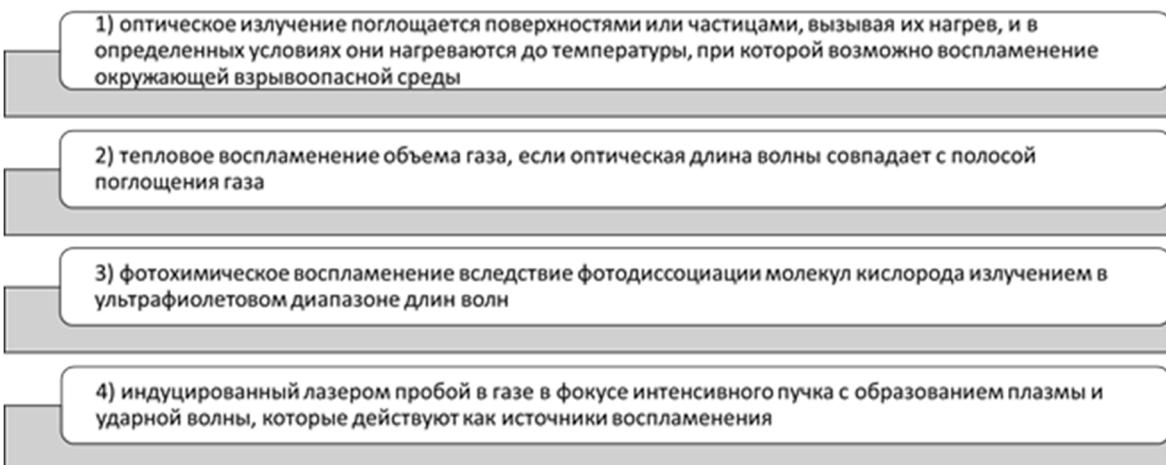


Рис. 2. Механизмы воспламенения

Для ряда газов и паров минимальная температура самовоспламенения локализуется в диапазоне от 100 до 550 °С, при этом взрывобезопасным уровнем мощности является уровень в пределах от 70 до 400 мВт (табл. 1) [14]. Таким образом, если оптическая мощность составляет от 70 мВт и выше, при распространении оптического излучения в потенциально взрывоопасной среде, то сохраняется риск воспламенения или взрыва¹.

Таблица 1

Наименьшие температуры самовоспламенения некоторых газов в смеси с воздухом при атмосферном давлении и минимальная воспламеняющая мощность

Газ	Температура самовоспламенения, °С	Минимальная воспламеняющая мощность, мВт
Пропан	500	390
Водород	530	200
Диэтилэфир	160	120
Сероуглерод	100	70

В целях повышения безотказной надежной работы системы и точности производимых измерений, для предотвращения второго механизма воспламенения, описанного в ГОСТ 31610.28–2012/IEC 60079-28:2006, рекомендуется применять светоизлучающие диоды, длина волны оптического излучения которых не соответствует длине волны поглощения газа, присутствующего в зоне измерений.

Обсуждение

На участке системы мониторинга технического состояния объектов (рис. 3) на основе проектируемых ВОД с ООК, включающих волоконно-оптические и другие элементы для исключения проявления механизмов воспламенения с помощью энергетического расчета, оценена ее искробезопасность [7, 8, 11, 12, 15, 16]. Обеспечение энергетического баланса оптической мощности в тракте передачи информации между источником излучения и приемником является необходимым условием для функционирования искробезопасной системы мониторинга.

Оптический сигнал, двигаясь по элементам тракта системы по пути от источника излучения до приемника излучения, проходя по волоконно-оптическому кабелю, минует несколько узлов юстировки, при этом каждый элемент участка системы вносит определенный процент потерь потока света η_n . В непосредственной зоне измерения волоконно-оптического преобразователя также присутствуют некоторые потери светового потока. Произведена оценка возможного значения затухания потока, вносимых элементами тракта источников потерь системы мониторинга технического состояния (табл. 2). По оценке суммарные световые потери системы мониторинга будут составлять $\eta_{\Sigma} = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 Q + \eta_6 Q + \eta_7 Q)N$. Затухание во всем ВОК составляет 0,05–0,2 дБ/км

¹ ГОСТ 31610.28-2012/IEC 60079-28:2006. Взрывоопасные среды. Часть 28. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение (IEC 60079-28:2006, IDT).

и ввиду того, что длина оптических волокон в зоне измерения не более 1 м, поэтому можно допустить, что $\eta_2 \approx \eta_6 \approx 0$.

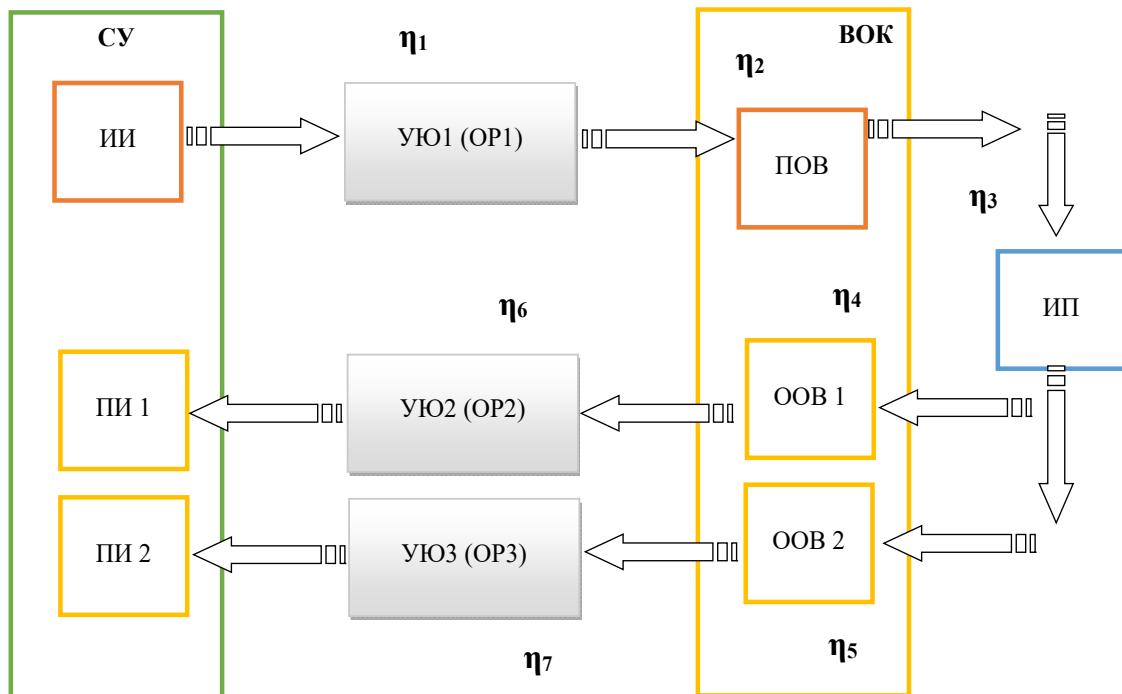


Рис. 3. Расчетная схема участка системы мониторинга с ВОД

Таблица 2

Суммарные световые потери системы мониторинга

Элемент тракта	Суммарное затухание, дБ при N – количество повторений
Ввод излучения от светодиода в кабель, узел юстировки	$\eta_1 = (10...11)N$
Волоконно-оптический кабель, при длине Q одиночного волокна до 100 м	$(\eta_2 + \eta_6 Q)N = ((0,15 - 0,06)2Q)N$
Ввод излучения от кабеля в преобразователь, узел юстировки	$\eta_3 = (3...6)N$
Зона измерения, волоконно-оптический преобразователь	$\eta_4 N = (5...7)N$
Ввод излучения от преобразователя в кабель, узел юстировки	$\eta_5 = (10...11)N$
Ввод излучения от кабеля в фотодиод, узел юстировки	$\eta_7 = (10...11)N$

Угол раскрытия луча светодиода ($60\dots140^\circ$) значительно превосходит апертурный угол оптических волокон (12°), вследствие данного факта значительные потери светового потока происходят в элементе тракта при вводе излучения в ВОК и первом узле юстировки, т.е. $\eta_1 = 10\dots11$ дБ [12]. В узлах юстировки присутствуют потери светового потока, которые составляют от 0,5...0,7 до 2 дБ [12]. Количество точек разветвления (объединения) равно $N - 1$, тогда суммарные потери в них составят $\eta_3 = 2(N - 1)$ дБ, $\eta_9 = (0,5 - 0,7)(N - 1)$ дБ. В соответствии с данными, приведенными в табл. 2: минимальные суммарные потери определяются как $\eta_{\Sigma\min} \approx 10(N + 1)$ дБ, а максимальные суммарные потери определяются как $\eta_{\Sigma\max} \approx 13(N + 1)$ дБ, тогда суммарные потери в оптических трактах: при $N = 1$ $\eta_{\Sigma} \approx 20\dots26$ дБ; а при $N = 3$ $\eta_{\Sigma} \approx 40\dots52$ дБ.

Диапазон чувствительности приемника излучения составляет от минус 38 до минус 56 дБ. В оптическое волокно необходимо вводить мощность светового потока не менее 0,05...0,1 мВт. Для надежной работы системы при чувствительности приемника излучения около 45 дБ необходимо обеспечить вводимую в волокно оптическую мощность минус 5 дБ. Чтобы компенсировать потери мощности в тракте источник излучения должен выдавать 0,63 мВт. На основе ранних исследований [10, 12] выбираются маломощные инфракрасные светодиоды и фотодиоды, согласованные с ними по оптическому спектру излучения (табл. 3).

Таблица 3

Рекомендованные маломощные свето- и фотодиоды

Светодиод	Фотодиод
ЗЛ107Б	ФД256
ЗЛ107Б	КФДМ
ЗЛ107Б	ФД-20-32К
ЗЛ119	ФД19КК

Дополнительно необходимо отметить, что приведенные в табл. 2 элементы имеют повышенную надежность, подтвержденную их использованием на изделиях ракетно-космической техники.

ВОСМ технического состояния крупных сооружений соответствует требованиям искробезопасности. Поскольку, во-первых, максимальная мощность в зоне расположения электронных компонентов (10 мВт) значительно ниже критического значения (70 мВт). Во-вторых, мощность в зоне измерения существенно ниже допустимого значения (0,05...0,1 мВт << 70 мВт) [17, 18].

Заключение

В соответствии с установленными критериями искробезопасности сред, в которых производится измерение параметров крупных сооружений гражданского и специального назначения, в ходе исследования по результатам выполненного энергетического расчета оптической системы ВОД подтверждено, что обеспечена искробезопасность ВОСМ технического состояния сооружений при использовании ВОД с открытым оптическим каналом, при использовании в своем составе в качестве источников излучения ИК-светодиоды малой мощности.

Список литературы

- Горпинченко В. М., Егоров М. И. Мониторинг технического состояния конструкций социально значимых большепролетных сооружений Москвы // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 8. С. 16–19.
- Платова С. В. Новые технологии мониторинга оборудования АЭС // Атомная техника за рубежом. 2017. № 6. С. 3–14.
- Калижанова А. У., Караганова Г. Б., Козбакова А. Х. [и др.]. Анализ и исследование существующего опыта проектирования и использования различных современных волоконно-оптических датчиков для контроля состояния механических и строительных конструкций // Вестник КазАТК. 2021. № 3. С. 112–123.
- Берберова М. А., Чунеко В. В., Золотарев О. В. [и др.]. Разработка программы мониторинга (контроля) обеспечения безопасности атомных электростанций // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2020. № 2. С. 50–56.
- Бурсов Н. Г., Обухов А. Е., Димитриади Н. П. Мониторинг напряженно-деформированного состояния зданий и сооружений на стадии возведения // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / под ред. О. Н. Лешкевича [и др.]. Минск, 2014. Вып. 6. С. 45–58.
- Хидиров С. Т. Мониторинг напряженно-деформированного состояния оснований зданий и сооружений как фактор обеспечения безопасной эксплуатации // Инновации и инвестиции. 2020. № 12. С. 291–294.
- Бадеева Е. А., Бадеев В. А. Волоконно-оптические датчики для систем мониторинга напряженно-деформированного состояния крупных сооружений // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты : сб. тр. III Нац. науч.-практ. конф. (г. Москва, 27–28 мая 2024 г.). М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. профессора Н. Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА им. профессора Н. Е. Жуковского, 2024. С. 671–673.
- Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Бадеев В. А. Конструктивно-технологическое решение волоконно-оптического датчика для экспресс-анализа качества нефти и нефтепродуктов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 108–115. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-12
- Bothe H., Schenk S., Hawksworth S. [et al.]. The safe use of optics in potentially explosive atmospheres // International Conference on Explosion Safety in Hazardous Areas. 1999. № 469. doi: 10.1049/cp:19991066
- Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Бадеев В. А., Кукушкин А. Н. Искробезопасность волоконно-оптических датчиков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2025. Т. 2. С. 288–292.
- Бадеев В. А., Мурашкина Т. И. Микрорефрактометрический измерительный преобразователь для определения качества жидкостных сред // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 474–476.
- Бадеева Е. А., Гориш А. В., Мурашкина Т. И. [и др.]. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом : монография / под общ. ред. Т. И. Мурашкиной, А. В. Гориша. М. : МГУЛ, 2004. 246 с.

13. Задворнов С. А., Соколовский А. А. О пожаробезопасности волоконно-оптических гибридных измерительных систем // Датчики и системы. 2007. № 3. С. 11–14.
14. Илюшов Н. Я. Пожаровзрывобезопасность. Горение веществ и материалов : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. 142 с.
15. Патент на изобретение RU 2795841 C1. Волоконно-оптический датчик температуры / Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Серебряков Д. И., Дудоров Е. А., Хасаншина Н. А., Бадеев В. А. № 2022101971 ; заявл. 28.01.2022 ; опубл. 12.05.2023, Бюл. № 14.
16. Патент на изобретение RU 2786690 C1. Волоконно-оптический датчик деформации / Бадеева Е. А., Бадеев В. А., Мурашкина Т. И., Серебряков Д. И., Толова А. А., Кукушкин А. Н. № 2022102897 ; заявл. 07.02.2022 ; опубл. 23.12.2022, Бюл. № 36.
17. Фокина Е. А., Трофимов А. А., Пономарев В. Н., Здобнов С. А. Проектирование имитационной модели датчика температуры при воздействии критических температур и синусоидальной вибрации // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 66–72.
18. Кубасов И. А., Лекарь Л. А. Проектирование системы автоматического мониторинга подвижных территориально разнесенных объектов // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 5–14.

References

1. Gorpichenko V.M., Yegorov M.I. Monitoring of the technical condition of structures of socially significant large-span structures in Moscow. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo = Industrial and civil engineering*. 2006;(8):16–19. (In Russ.)
2. Platova S.V. New technologies for monitoring NPP equipment. *Atomnaya tekhnika za rubezhom = Nuclear technology abroad*. 2017;(6):3–14. (In Russ.)
3. Kalizhanova A.U., Kashaganova G.B., Kozbakova A.Kh. et al. Analysis and research of existing experience in designing and using various modern fiber-optic sensors to monitor the condition of mechanical and building structures. *Vestnik KazATK = Bulletin of KazATK*. 2021;(3):112–123. (In Russ.)
4. Berberova M.A., Chuyenko V.V., Zolotarev O.V. et al. Development of a program for monitoring (control) safety of nuclear power plants. *Avtomatizatsiya i modelirovaniye v proyektirovaniii i upravlenii = Automation and modeling in design and management*. 2020;(2):50–56. (In Russ.)
5. Bursov N.G., Obukhov A.E., Dimitriadi N.P. Monitoring of the stress-strain state of buildings and structures at the construction stage. *Problemy sovremennoego betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr. = Problems of modern concrete and reinforced concrete : collection of scientific papers*. Minsk, 2014;(6):45–58. (In Russ.)
6. Khidirov S.T. Monitoring of the stress-strain state of the foundations of buildings and structures as a factor in ensuring safe operation. *Innovatsii i investitsii = Innovations and investments*. 2020;(12):291–294. (In Russ.)
7. Badeyeva E.A., Badeyev V.A. Fiber-optic sensors for monitoring systems of the stress-strain state of large structures. *Fundamentalnyye, poiskovyye, prikladnyye issledovaniya i innovatsionnyye proyekty: sb. tr. III Nats. nauch.-prakt. konf. (g. Moskva, 27–28 maya 2024 g.) = Fundamental, exploratory, applied research and innovative projects : proceedings of the III National Scientific and Practical Conference (Moscow, May 27-28, 2024)*. Moscow: Assotsiatsiya vypusknikov i sotrudnikov VVIA im. professora N.E. Zhukovskogo sodeystviya sokhraneniyu istori-cheskogo i nauchnogo naslediya VVIA im. professora N.E. Zhukovskogo, 2024:671–673. (In Russ.)
8. Murashkina T.I., Badeyeva E.A., Badeyev V.A. Constructive and technological solution of a fiber-optic sensor for rapid quality analysis of oil and petroleum products. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):108–115. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-12
9. Bothe H., Schenk S., Hawksworth S. et al. The safe use of optics in potentially explosive atmospheres. *International Conference on Explosion Safety in Hazardous Areas*. 1999;(469). doi: 10.1049/cp:19991066
10. Badeyeva E.A., Murashkina T.I., Badeyev V.A., Kukushkin A.N. Intrinsic safety of fiber-optic sensors. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2025;2:288–292. (In Russ.)
11. Badeyev V.A., Murashkina T.I. Microrefractometric measuring transducer for determining the quality of liquid media. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:474–476. (In Russ.)
12. Badeyeva E.A., Gorish A.V., Murashkina T.I. et al. *Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya amplitudnykh volokonno-opticheskikh datchikov davleniya s otkrytym opticheskim kanalom: monografiya = Theoretical foundations of designing amplitude fiber-optic pressure sensors with an open optical channel : monograph*. Moscow: MGUL, 2004:246. (In Russ.)
13. Zadvornov S.A., Sokolovskiy A.A. On fire safety of fiber-optic hybrid measuring systems. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2007;(3):11–14. (In Russ.)
14. Ilyushov N.Ya. *Pozharovzryvobezopasnost. Goreniiye veshchestv i materialov: ucheb. posobiye = Fire and explosion safety. Gorenje substances and materials : a textbook*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2017:142. (In Russ.)

15. Patent na izobreteniye RU 2795841 C1. Fiber-optic temperature sensor. Murashkina T.I., Badeyeva E.A., Serebryakov D.I., Dudorov E.A., Khasanshina N.A., Badeyev V.A. № 2022101971; appl. 28.01.2022; publ. 12.05.2023, Bull. № 14. (In Russ.)
16. Patent na izobreteniye RU 2786690 C1. Fiber-optic strain sensor. Badeyeva E.A., Badeyev V.A., Murashkina T.I., Serebryakov D.I., Tolova A.A., Kukushkin A.N. № 2022102897; appl. 07.02.2022; publ. 23.12.2022, Bull. № 36. (In Russ.)
17. Fokina E.A., Trofimov A.A., Ponomarev V.N., Zdobnov S.A. Designing a simulation model of a temperature sensor under the influence of critical temperatures and sinusoidal vibration. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(3):66–72. (In Russ.)
18. Kubasov I.A., Lekar L.A. Designing an automatic monitoring system for mobile geographically dispersed objects. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(2):5–14. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Александровна Бадеева

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: badeeva_elena@mail.ru

Elena A. Badeeva

Doctor of technical sciences, associate professor, professor of the sub-department of radio engineering and radio electronic systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владислав Александрович Бадеев

лаборант-исследователь, научно-технический центр «Нанотехнологии волоконно-оптических систем», Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vladbadeev4464@gmail.com

Vladislav A. Badeev

Research assistant, Nanotechnology of Fiber-Optic Systems Scientific and Technical Center, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Татьяна Ивановна Мурашкина

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: timurashkina.pgu@mail.ru

Tatyana I. Murashkina

Doctor of technical sciences, professor, professor of the sub-department of instrument making, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 07.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 30.04.2025

Принята к публикации/Accepted 19.05.2025

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

УДК 621.452.3

doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-11

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ПРИ ИМИТАЦИИ УДАРА С ПТИЦЕЙ

А. Р. Лепешкин¹, К. М. Аунг²

^{1, 2} Московский авиационный институт, Москва, Россия

¹ lepeshkin.ar@gmail.com, ² aungkhinemyint22@gmail.com

Аннотация. Актуальность и цели. Повреждения элементов авиационной техники при столкновениях с птицами существенно снижают уровень безопасности полетов в гражданской авиации. Наиболее опасным является попадание птицы в двигатель самолета, поэтому исследование соударения птицы с деталями двигателя является актуальной проблемой. Материалы и методы. Предлагается расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора при имитации удара с птицей. Разработанный метод позволяет исследовать ударные процессы и явления в лопатках вентилятора двигателя при имитации соударения с птицей с помощью устройства со специальным ударником и системы регистрации на специальной установке. Результаты и выводы. С помощью разработанного метода зарегистрирована временная последовательность событий (картин интерферограмм, перемещений и напряжений) в любой момент времени после начала удара с помощью имитатора птицы (специального ударника) и, соответственно, получены результаты напряженно-деформированного состояния лопатки и параметров ударного процесса. Анализ результатов исследований с использованием разработанного метода позволяет получить изменение напряжений и перемещений в процессе соударения с имитатором птицы и определить участки лопатки, в которых наблюдаются максимальные напряжения и перемещения. Разработанный расчетно-экспериментальный метод и полученные рекомендации можно использовать для исследований нестационарного напряженно-деформированного состояния лопаток вентиляторов и других деталей двигателя и элементов летательных аппаратов при имитации удара с птицей.

Ключевые слова: расчетно-экспериментальный метод, расчетное моделирование, имитатор птицы, лопатка вентилятора, напряжения, перемещения, удар

Для цитирования: Лепешкин А. Р., Аунг К. М. Расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора при имитации удара с птицей // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 110–118. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-11

CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHOD OF STUDYING THE STRESS-STRAIN STATE OF A FAN BLADE WHEN SIMULATING AN IMPACT WITH A BIRD

A.R. Lepeshkin¹, K.M. Aung²

^{1, 2} Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

¹ lepeshkin.ar@gmail.com, ² aungkhinemyint22@gmail.com

Abstract. *Background.* Damage to aircraft components due to bird strikes significantly reduces the level of flight safety in civil aviation. The most dangerous is when a bird hits an aircraft engine, so the study of bird strikes on engine parts is a pressing issue. *Materials and methods.* A computational and experimental method for studying the stress-strain state of a fan blade during a simulated impact with a bird is proposed. The developed method allows one to study impact processes and phenomena in engine fan blades during a simulated impact with a bird using a device with a special striker and registration systems on a special installation. *Results and conclusions.* The developed method allowed us to record the time sequence of events (interferogram patterns, displacements and stresses) at any time after the start of the impact using a bird simulator (special striker) and, accordingly, to obtain the results of the stress-strain state of the blade and the parameters of the impact process. Analysis of the research results using the developed method allows us to obtain a change in stresses and displacements during the impact with the bird simulator and to determine the blade sections in which maximum stresses and displacements are observed. The developed calculation and experimental method and the obtained recommendations can be used to study the non-stationary stress-strain state of fan blades and other engine parts and aircraft elements during the imitation of an impact with a bird.

Keywords: computational-experimental method, computational modeling, bird simulator, fan blade, stresses, displacements, impact

For citation: Lepeshkin A.R., Aung K.M. Calculation and experimental method of studying the stress-strain state of a fan blade when simulating an impact with a bird. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):110–118. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-11

Введение

Анализ повреждений авиационной техники и авиационных газотурбинных двигателей в условиях эксплуатации рассматривается во многих работах [1–7]. Следует также учитывать и повреждения элементов авиационной техники при столкновениях с птицами, которые существенно снижают уровень безопасности полетов в гражданской авиации. Требования к прочностной надежности двигателей летательных аппаратов при столкновении с птицами или обрыве лопатки вентилятора должны быть подтверждены при специальных испытаниях деталей двигателя [1, 7–10]. Наиболее распространенным способом подтверждения птицестойкости двигателя является проведение испытаний с забросом в работающий двигатель птиц, соответствующих по числу и массе. Однако при всей наглядности испытаний с забросом птиц невозможно дать исчерпывающую оценку действительной стойкости двигателя столкновению с птицами. Кроме того, такие испытания характеризуются высокой стоимостью экспериментов в натурном исполнении. Расчетный анализ позволяет расширить знания и представления об ударном процессе взаимодействия птицы с лопаткой вентилятора двигателя и позволяет сократить количество экспериментов и, соответственно, снизить стоимость испытаний. Имеется достаточно большое количество аналитических и численных моделей [10–16], описывающих поведение лопатки вентилятора при попадании в нее посторонних предметов – птиц. Однако расчетный анализ используется для некоторого косвенного сравнения с экспериментом и не используется для обработки результатов экспериментов.

В связи с этим в данной работе предлагается к рассмотрению расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора при имитации удара с птицей на специальной установке. Предлагаемый разработанный расчетно-экспериментальный метод имеет научную новизну, теоретическую и практическую значимость и позволяет исследовать ударные процессы и явления и напряженно-деформированное состояние в лопатках вентилятора СУ при имитации соударения с птицей с использованием специального оборудования, системы регистрации с ПЗС-камерой и расчетно-программного обеспечения. ПЗС-камеры успешно используются и в других научных областях [17].

Методика и результаты исследований

Известно, что при исследовании ударных явлений необходимо осуществить запуск регистрирующей аппаратуры до того, как ударник (имитатор птицы) войдет в соприкосновение с исследуемой лопаткой или ее моделью. Это необходимо для того, чтобы регистрация процесса началась в момент контакта или в любое заданное время после начала события. Таким образом, при использовании голограммической интерферометрии [18, 19] появляется широкая возможность получить временную последовательность событий (картин интерферограмм и перемещений) в любой момент времени после начала удара с помощью ударника, получающего импульс энергии от электромагнитной катушки. Регистрация развертки исследуемого процесса производилась с использованием цифровой камеры с ПЗС-матрицей на специальной голограммической установке. Таким образом была получена последовательность интерферограмм лопатки, соответствующих каждому моменту времени (рис. 1), т.е. с учетом времени задержки после начала удара.

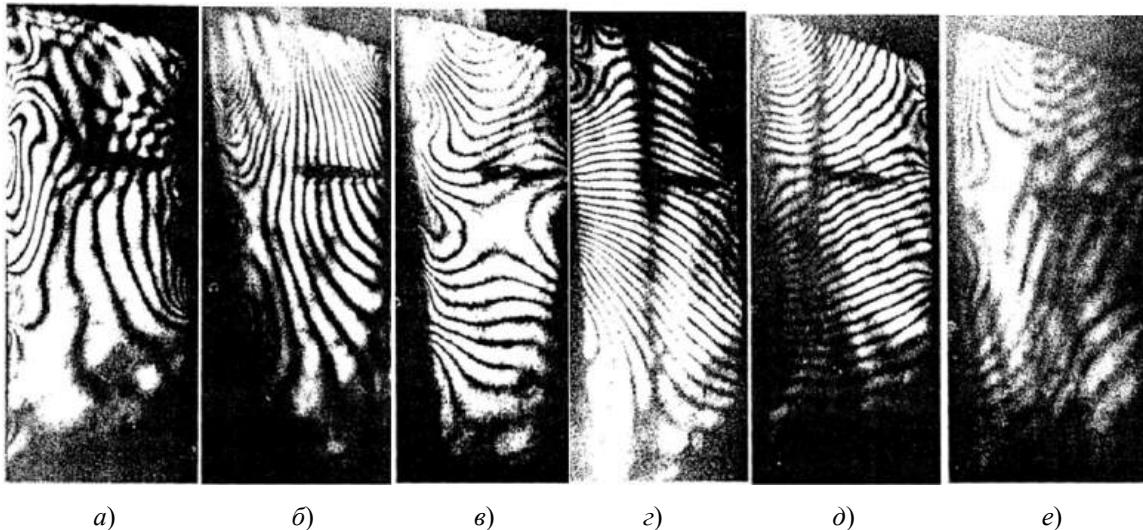


Рис. 1. Последовательность интерферограмм лопатки вентилятора при имитации соударения с птицей:
a – $\tau = 0,5$ мс; б – $\tau = 1,5$ мс; в – $\tau = 2,5$ мс; г – $\tau = 5$ мс; д – $\tau = 10$ мс; е – $\tau = 25$ мс

Далее начинается расчетная часть разработанного расчетно-экспериментального метода. На первом этапе расчета каждая интерферограмма (соответствующая своему моменту времени) обрабатывается по специальному алгоритму для получения картины перемещений по поверхности лопатки вентилятора. На втором этапе расчета исходные данные в виде картины перемещений и геометрии, а также механические свойства титановой лопатки вентилятора вводятся в конечно-элементную программу Lar Shell. Специализированная программа Lar Shell предназначена для расчета напряженно-деформированного состояния НДС деталей и лопаток в форме оболочек с использованием треугольных элементов. Подготовка исходных данных и более простое формирование конечно-элементной сетки модели лопатки вентилятора в форме оболочки значительно упрощает работу с программой Lar Shell и снижает время получения результатов расчета по сравнению, например, с пакетом программ ANSYS. С использованием Lar Shell (на основе экспериментальных данных по перемещениям) были рассчитаны и получены картины напряженного и деформированного состояния лопатки вентилятора в разные моменты времени ударного процесса. Для проведения расчетных исследований на рис. 2 представлена геометрия лопатки вентилятора с указанием нумерации узлов по периметру лопатки.

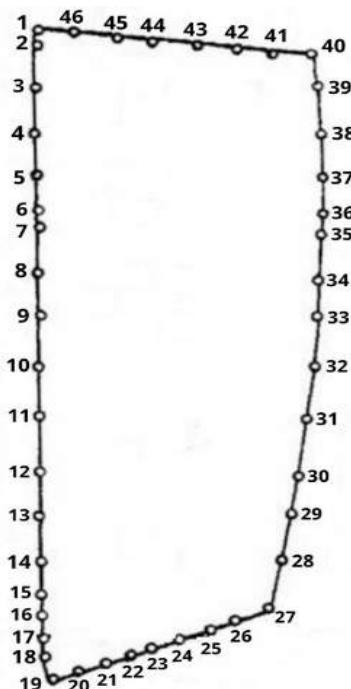


Рис. 2. Геометрия лопатки вентилятора

Для примера одного из проведенных расчетов на рис. 3 представлены интерферограмма (рис. 3,*a* – время задержки 10 мс) и соответствующие ей картины перемещений (рис. 3,*б*) и результаты расчета напряжений σ_1 (рис. 3,*в*) и σ_2 (рис. 3,*г*).

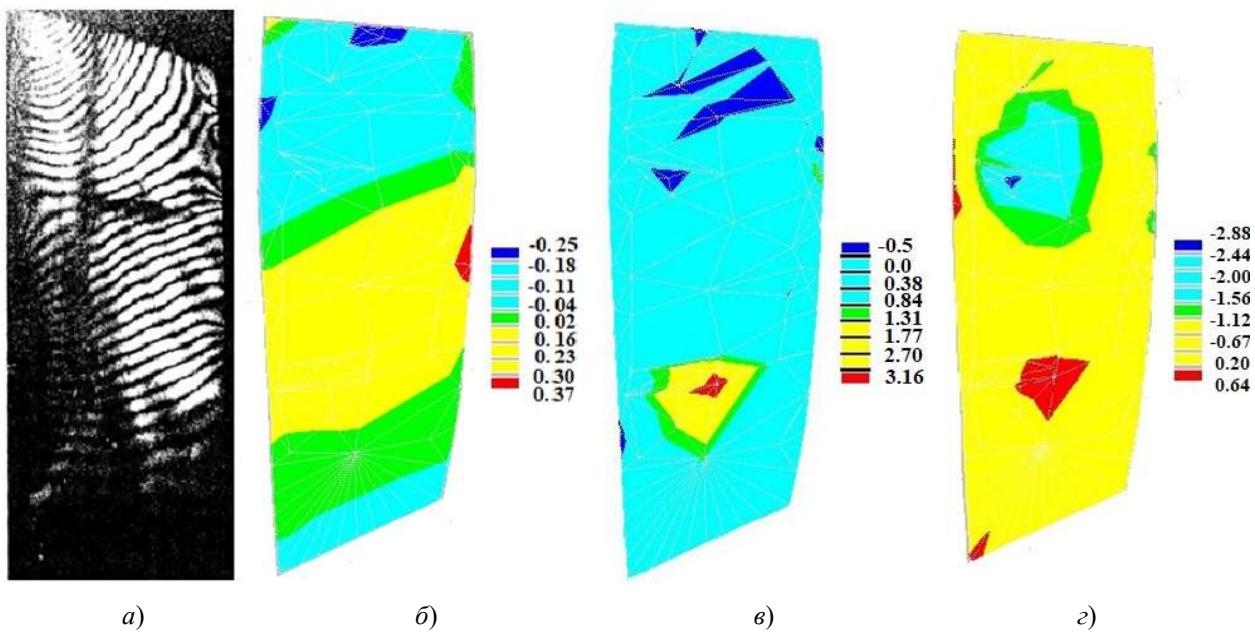


Рис. 3. Интерферограмма (*a*), картины перемещений (*б*) и напряжений σ_1 и σ_2 (*в*, *г*)

В результате проведенной работы с использованием расчетно-экспериментального метода для лопатки первой ступени вентилятора СУ были получены голограммические интерферограммы с различными временами задержки относительно начала удара имитатором птицы (рис. 1), зависимости максимальных перемещений (рис. 4) и напряжений σ_1 (рис. 5) от времени в зоне удара (узел 4) и зависимости напряжений σ_1 во всех узлах периферии (рис. 2) лопатки вентилятора от времени ударного динамического процесса, показанного на рис. 6–9. Несмотря на снижение напряжений после 3 мс в зоне удара (рис. 5), далее можно увидеть, что повышенные напряжения на разных участках лопатки вентилятора будут наблюдаться в последующие моменты времени (рис. 6–9), что характеризуется сложным ударным динамическим и колебательным процессом.

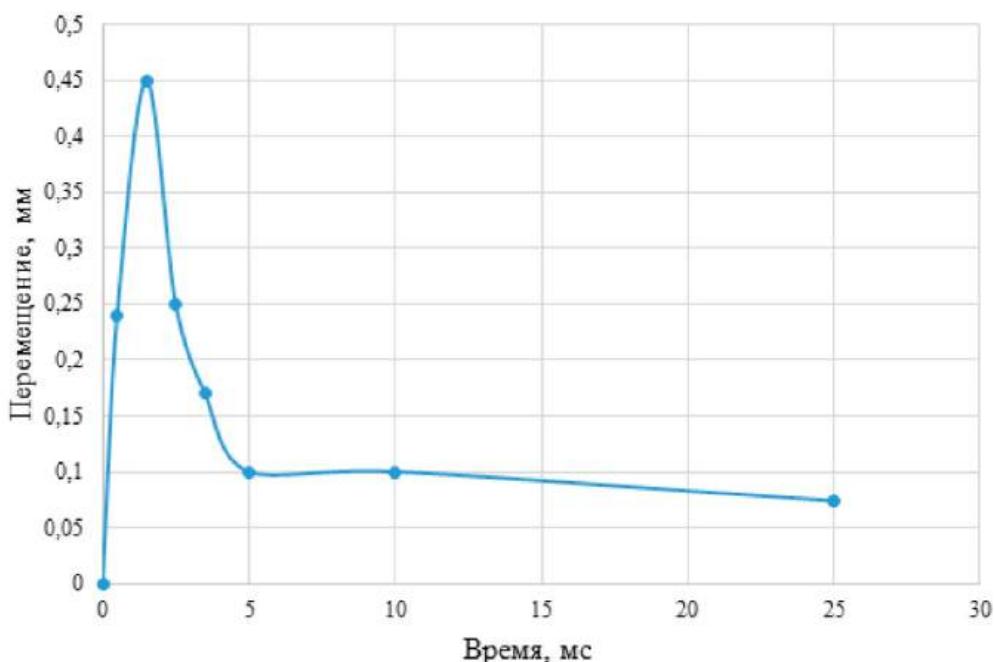


Рис. 4. Зависимость перемещений в зависимости от времени ударного динамического процесса

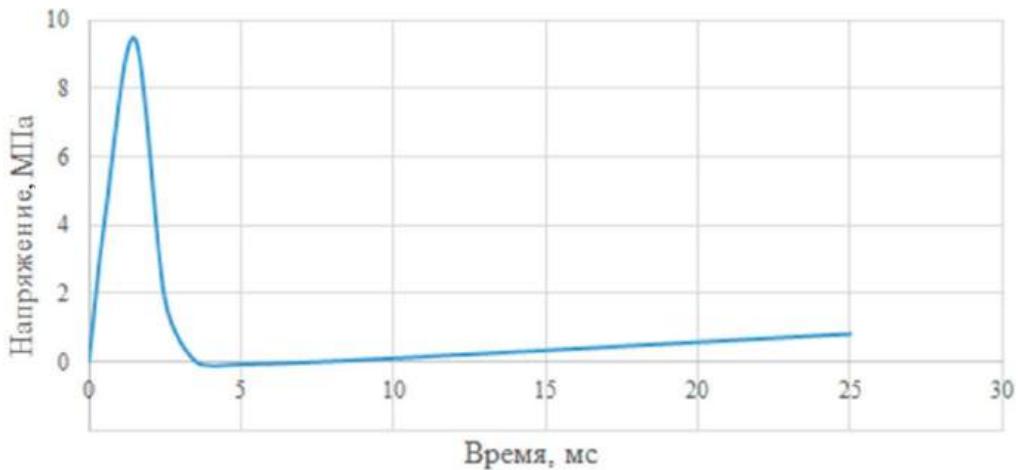


Рис. 5. Зависимость напряжений в зависимости от времени ударного динамического процесса

Полученные результаты позволяют наглядно представить механизм развития ударного динамического процесса. Анализ исследований напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора при имитации соударения с птицей с использованием разработанного расчетно-экспериментального метода показал, что по входной кромке, по которой производится удар, относительно большие напряжения возникают в узле 4 на отрезке времени 0,5...2,5 мс (см. рис. 5), а также в узлах 4, 7 в момент времени 2,5 мс и в узле 8 в момент времени 5 мс не только в этой кромке (см. рис. 6), но и на выходной кромке (узлы 28, 30, 27 на рис. 8) вблизи корневой части лопатки в момент времени 2,5 мс и в корневой части в моменты времени: 2,5 мс (узел 26, 25 на рис. 7), 5 мс (узлы 25, 24, 26 на рис. 7), 25 мс (узлы 22, 21, 23 на рис. 7) и в нижней половине (на середине) лопатки на рис. 3,в.

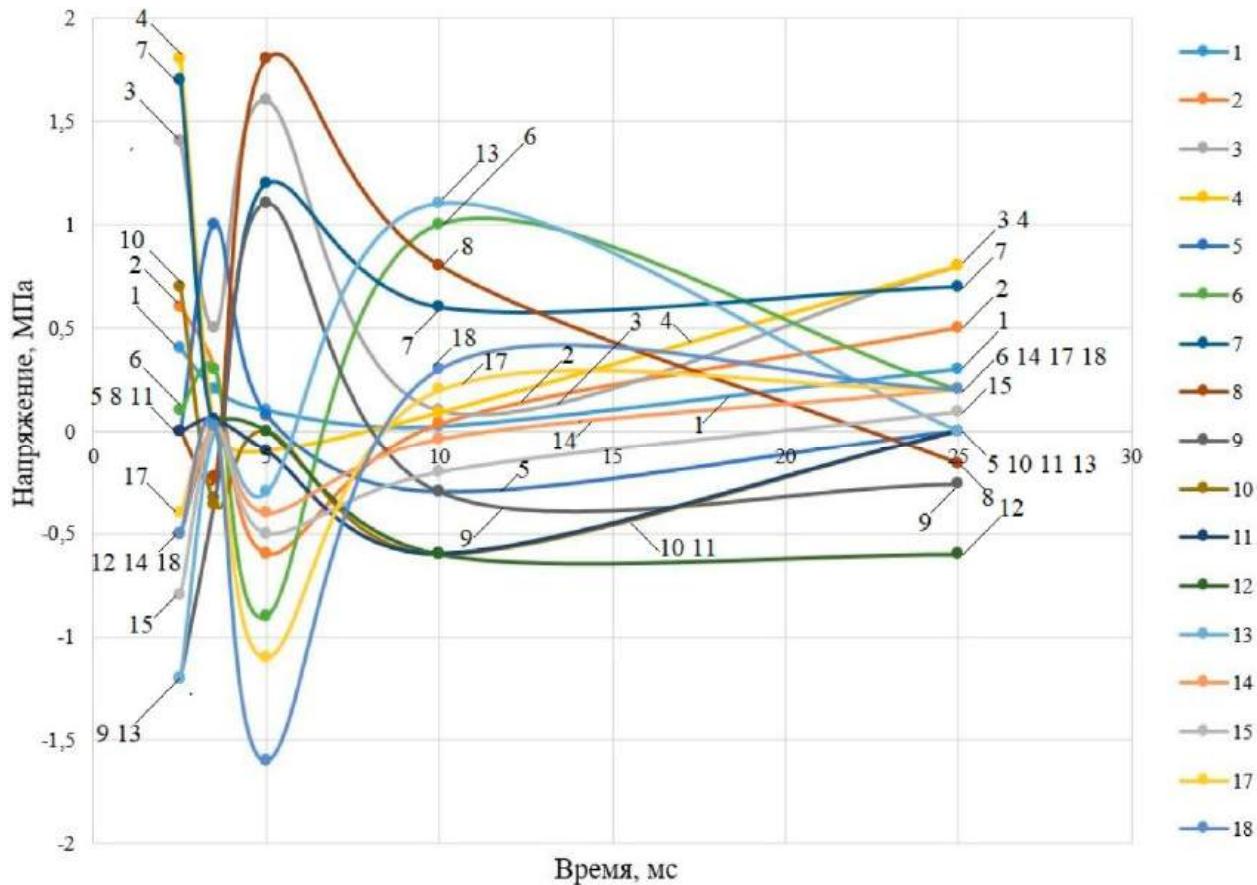


Рис. 6. Зависимости напряжений в узлах 1–18 периферии лопатки вентилятора от времени ударного динамического процесса

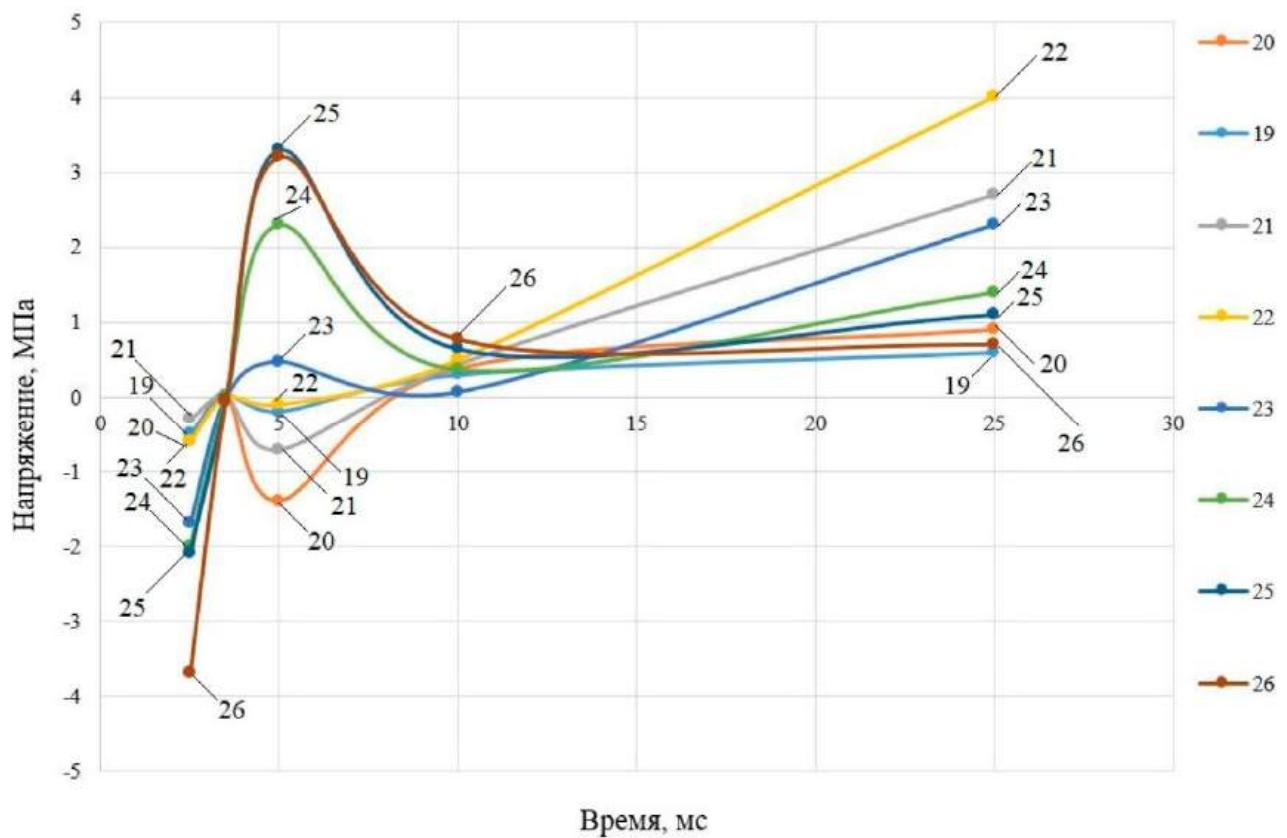


Рис. 7. Зависимости напряжений в узлах 19–26 периферии лопатки вентилятора от времени ударного динамического процесса

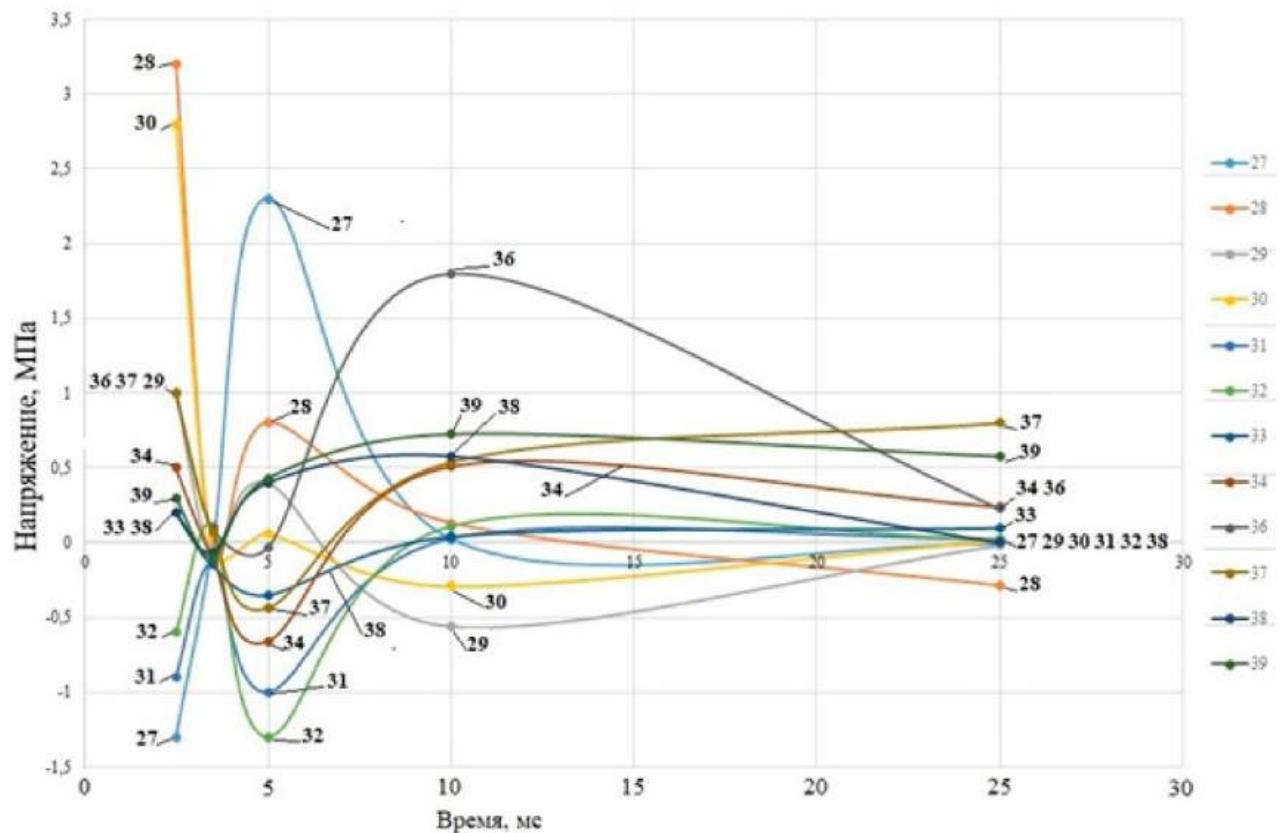


Рис. 8. Зависимости напряжений в узлах 27–39 периферии лопатки вентилятора от времени ударного динамического процесса

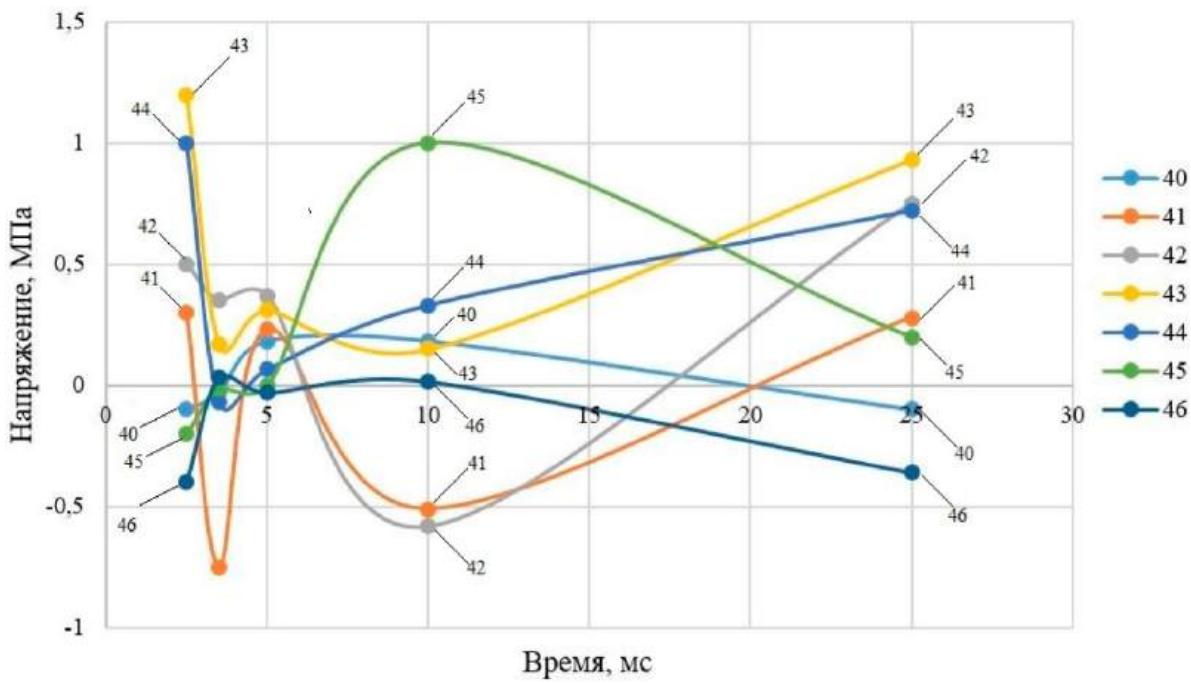


Рис. 9. Зависимости напряжений в узлах 40–46 периферии лопатки вентилятора от времени ударного динамического процесса

Заключение

Разработан расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора при имитации удара с птицей на основе экспериментальных данных. Предложенный метод позволяет исследовать ударные процессы и явления в лопатках вентилятора силовой установки при имитации соударения с птицей. С помощью данного метода зарегистрирована временная последовательность событий (картин интерферограмм, перемещений и напряжений) в каждый момент времени после начала удара с помощью имитатора птицы (специального ударника). Анализ результатов исследований с использованием разработанного метода показал, что можно получить изменение напряжений и перемещений в процессе соударения с имитатором птицы и определить участки лопатки, в которых наблюдаются максимальные напряжения и перемещения. Разработанный расчетно-экспериментальный метод и полученные рекомендации можно использовать для исследований нестационарного напряженно-деформированного состояния лопаток вентиляторов и других деталей и элементов летательных аппаратов при имитации удара с птицей.

Список литературы

- Лепешкин А. Р., Ильинская О. И., Маликов С. Б. Динамика и прочность авиационных газотурбинных двигателей : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2020. 100 с.
- Дмитриев С. А., Симонова Е. С. Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007–2020 годы // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 81–90. doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-10
- Болознев В. В., Застела М. Ю., Мирсаитов Ф. Н. К проблеме функциональной диагностики газотурбинного двигателя по спектрам 3D-вibrаций // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1. С. 79–85.
- Барзов А. А., Григорьев А. С., Сеина Я. Д. [и др.]. Модель прогнозирования ресурсных параметров изделий путем мезодиагностирования их функциональной поврежденности при эксплуатации // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 109–116. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-14
- Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С. Нижняя доверительная граница среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых объектов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 38–45. doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-5
- Северцев Н. А., Дарьина А. Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 5–14. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1
- Лепешкин А. Р., Аунг К. М. Методика специальных испытаний элементов летательного аппарата // Научные чтения по авиации, посвященные памяти профессора Н. Е. Жуковского : сб. тр. XXI Всерос. науч.-техн. конф. М. : Экспериментальная мастерская НаукаСофт, 2024. Вып. 12. С. 35–50.

8. Лепешкин А. Р. Поперечный С. С., Ильинская О. И. Испытания элементов ЛА и узлов ГТД на птицестойкость // В отраслевая конференция по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов – КИМИЛА : сб. тр. Жуковский : ЦАГИ, 2023. С. 313–323.
9. Моргачев К. В. Стендовые испытания авиационной техники на столкновение с посторонними предметами (птицестойкость) // Автоматизация в промышленности. 2015. № 10. С. 32–35.
10. Шорр Б. Ф., Гладкий И. Л., Мельникова Г. В. [и др.]. Стендовые испытания по забросу птиц на невращающуюся лопатку вентилятора // Авиационные двигатели. 2020. № 1 (16). С. 31–38. doi: 10.54349/26586061-2020-1-31
11. Badshah S., Naeem A., Rafique A. F. [et al.]. Numerical study on the critical frequency response of jet engine rotors for blade of conditions against bird strike // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, № 24. P. 5568. doi: 10.3390/app9245568
12. Wu B., Hedayati R., Li Z. [et al.]. Effect of impact and bearing parameters on bird strike with aero-engine fan blades // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. P. 7. doi:10.3390/app12010007
13. Yella G., Jadhav P., Lande C. Bird-strike analysis on hybrid composite fan blade: blade-level validation // Aerospace. 2023. Vol. 10. P. 435. doi: 10.3390/aerospace10050435
14. Jadhaf P. Wavy trailing Edge Feasibility for Aircraft Engine Composite Fan Blade // Materials Science Forum. 2022. Vol. 1060. P. 51–56. doi: 10.4028/p-4ubl99
15. Sharis-Shazzali S., Azam A. N., Meftah H. [et al.]. Numerical modelling of bird strike on rotating engine blades based on variation of porosity density // IIUM Engineering Journal. 2022. Vol. 23, № 1. P. 412–423. doi: 10.31436/iuemj.v23i1.2146
16. Shorr B. F., Serebriakov N. N., Melnikova G. V. [et al.]. Computational and experimental study of bird failure at different speeds of collision with a flexible plate // The International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020). Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1891. 012050. doi: 10.1088/1742-6596/1891/1/012050
17. Жабин В. С., Муртазов А. К. Надежность регистрации быстролетящих объектов ПЗС-системой в метеорной астрономии // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 103–108. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-13
18. Petrov V., Pogoda A., Sementin V. [et al.]. Advances in digital holographic interferometry // Journal of Imaging. 2022. Vol. 8, № 7. P. 196. doi: 10.3390/jimaging8070196
19. Селезнев В. Г., Головченко И. Ю., Ильинская О. И. Определение декремента колебаний компрессорных и турбинных лопаток методом голографической интерферометрии // Авиационная промышленность. 2016. № 4. С. 17–20.

References

1. Lepeshkin A.R., Il'inskaya O.I., Malikov S.B. *Dinamika i prochnost' aviationsionnykh gazoturbinnikh dvigateley: ucheb. posobiye = Dynamics and strength of aviation gas turbine engines : a textbook*. Moscow: Izd-vo MAI, 2020:100. (In Russ.)
2. Dmitriyev S.A., Simonova E.S. Analysis of failures and damages of aircraft engines for the period 2007–2020. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):81–90. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-10
3. Boloznev V.V., Zastela M.Yu., Mirsaitov F.N. On the problem of functional diagnostics of a gas turbine engine based on 3D vibration spectra. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(1):79–85. (In Russ.)
4. Barzov A.A., Grigor'yev A.S., Seina Ya.D. et al. A model for predicting the resource parameters of products by mesodiagnosing their functional damage during operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):109–116. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-14
5. Sadykhov G.S., Kudryavtseva S.S. The lower confidence limit of the average residual resource of non-recoverable objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):38–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-5
6. Severtsev N.A., Dar'ina A.N. Application of similarity criteria in resource testing of complex technical systems and products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4): 5–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1
7. Lepeshkin A.R., Aung K.M. Methodology of special tests of aircraft elements. *Nauchnyye chteniya po aviatsii, posvyashchennyye pamyati professora N.E. Zhukovskogo: sb. tr. XXI Vseros. nauch.-tekhn. konf. = Scientific readings on aviation dedicated to the memory of Professor N. E. Zhukovsky : proceedings of the XXI All-Russian scientific and technical conference*. Moscow: Ekspertperimental'naya masterskaya NaukaSoft, 2024;(12):35–50. (In Russ.)
8. Lepeshkin A.R. Poperechnyy S.S., Il'inskaya O.I. Testing of aircraft elements and GTD assemblies for bird resistance. *V otrasslevaya konferentsiya po izmeritel'noy tekhnike i metrologii dlya issledovaniy letatel'nykh apparatov – KIMILA: sb. tr. = V Branch Conference on Measuring technology and Metrology for aircraft research – KIMILA : proceedings*. Zhukovskiy: TSAGI, 2023:313–323. (In Russ.)

9. Morgachev K.V. Bench tests of aviation equipment for collision with foreign objects (bird resistance). *Avtomatsiya v promyshlennosti = Automation in industry.* 2015;(10):32–35. (In Russ.)
10. Shorr B.F., Gladkiy I.L., Mel'nikova G.V. et al. Bench tests for casting birds onto a non-rotating fan blade. *Avtosionnyye dvigateli = Aircraft engines.* 2020;(1):31–38. (In Russ.). doi: 10.54349/26586061-2020-1-31
11. Badshah S., Naeem A., Rafique A. F. et al. Numerical study on the critical frequency response of jet engine rotors for blade of conditions against bird strike. *Applied Sciences.* 2019;9(24):5568. doi: 10.3390/app9245568
12. Wu B., Hedayati R., Li Z. et al. Effect of impact and bearing parameters on bird strike with aero-engine fan blades. *Applied Sciences.* 2022;12:7. doi:10.3390/app12010007
13. Yella G., Jadhav P., Lande C. Bird-strike analysis on hybrid composite fan blade: blade-level validation. *Aerospace.* 2023;10:435. doi: 10.3390/aerospace10050435
14. Jadhaf P. Wavy trailing Edge Feasibility for Aircraft Engine Composite Fan Blade. *Materials Science Forum.* 2022;1060:51–56. doi: 10.4028/p-4ubl99
15. Sharis-Shazzali S., Azam A.N., Meftah H. et al. Numerical modelling of bird strike on rotating engine blades based on variation of porosity density. *IIUM Engineering Journal.* 2022;23(1):412–423. doi: 10.31436/iiumej.v23i1.2146
16. Shorr B.F., Serebriakov N.N., Melnikova G.V. et al. Computational and experimental study of bird failure at different speeds of collision with a flexible plate. *The International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020). Journal of Physics: Conference Series.* 2021;1891:012050. doi: 10.1088/1742-6596/1891/1/012050
17. Zhabin V.S., Murtazov A.K. Reliability of registration of fast-flying objects by the CCD system in meteoric astronomy. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(1): 103–108. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-13
18. Petrov V., Pogoda A., Sementin V. et al. Advances in digital holographic interferometry. *Journal of Imaging.* 2022;8(7):196. doi: 10.3390/jimaging8070196
19. Seleznev V.G., Golovchenko I.Yu., Il'inskaya O.I. Determination of oscillation decrement compressor and turbine blades by holographic interferometry. *Aviatsionnaya promyshlennost' = Aviation Industry.* 2016;(4):17–20. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Роальдович Лепешкин

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры проектирования
и сертификации авиационной техники,
Московский авиационный институт
(Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: lepeshkin.ar@gmail.com

Aleksandr R. Lepeshkin

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of aviation equipment design and certification,
Moscow Aviation Institute
(4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Кхайн Миинт Аунг

аспирант,
Московский авиационный институт
(Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: aungkhinemyint22@gmail.com

Khain Myint Aung

Postgraduate student,
Moscow Aviation Institute
(4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 04.05.2025

Поступила после рецензирования/Revised 20.05.2025

Принята к публикации/Accepted 15.06.2025

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.051, 006.015.7, 519.718, 519.876.2

doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-12

A TERNARY CONCEPTUAL FRAMEWORK OF CRITICAL INFRASTRUCTURE RESILIENCE MANAGEMENT CYCLE

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
a.masloboev@ksc.ru

Abstract. *Background.* The study considers hot-button issues of analysis and modeling of the critical infrastructure resilience cycle in order to engineering automated tools for management information support of the resilient functioning of these complex multicomponent systems under triggering events of various nature and scale. *Materials and methods.* The joint use of the process approach, the formal apparatus of ternary relations and the technology of conceptual modeling provide a methodological basis for an integrated solution to the problems of analyzing the critical infrastructures resilience cycle and synthesizing effective organizational and technical systems for situational management of their resilient functioning. *Results and conclusions.* A triadic hierarchical model of a typical U-shaped critical infrastructure resilience cycle, based on a conceptual definition of entities and ternary relations between them in the form of a set of triads and modeling the process of maintaining the system resilience at different stages of situational management, is proposed. The developed model provides the possibility of a pictorial systemic knowledge representation about the stages of critical infrastructure resilience management process by constructing chains of interrelated triads, the analysis of which allows to identify new capacities and patterns of the system functioning when critical situations occur, as well as to determine adequate measures and assets of ensuring resilience to improve the effectiveness of situational management. The results obtained can find application in the field of design automation of the ontological and simulation models of critical infrastructure resilience intended for subsequent use in the development of intelligent information technologies for managing critical entities and infrastructure systems.

Keywords: system analysis, conceptual modeling, management, triadic model, life-cycle, resilience, critical infrastructure

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).

For citation: Masloboev A.V. A ternary conceptual framework of critical infrastructure resilience management cycle. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):119–134. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-12

ТРИАДНАЯ КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬЮ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР

А. В. Маслобоев

Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия
a.masloboev@ksc.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Рассматриваются актуальные вопросы анализа и моделирования жизненного цикла жизнеспособности критических инфраструктур с целью разработки автоматизированных средств информационной поддержки управления устойчивым функционированием этих сложных многокомпонентных систем в условиях возникновения инициирующих событий различной природы и масштаба. Материалы и методы. Совместное применение процессного подхода, формального аппарата тернарных отношений и технологии концептуального моделирования обеспечивает методологическую основу системного решения задач анализа жизненного цикла жизнеспособности критических инфраструктур и синтеза эффективных организационно-технических систем ситуационного управления их устойчивым функционированием. Результаты и выводы. Предложена триадная иерархическая модель типового U-образного жизненного цикла жизнеспособности критических инфраструктур, основанная на концептуальном описании объектов и тернарных отношений между ними в виде совокупности триад и моделирующая процесс обеспечения жизнеспособности системы на различных этапах ситуационного управления. Разработанная модель обеспечивает возможность наглядного системного представления знаний об этапах процесса управления жизнеспособностью критических инфраструктур за счет построения цепочек взаимосвязанных триад, анализ которых позволяет выявить новые свойства и закономерности функционирования системы в условиях критических ситуаций, а также определить адекватные меры и средства обеспечения жизнеспособности для повышения эффективности ситуационного управления. Полученные результаты могут найти применение в сфере автоматизации синтеза онтологических и имитационных моделей жизнеспособности критических инфраструктур, предназначенных для последующего использования при разработке интеллектуальных информационных технологий управления критически важными объектами и системами.

Ключевые слова: системный анализ, концептуальное моделирование, управление, триадная модель, жизненный цикл, жизнеспособность, критическая инфраструктура

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2025-0054).

Для цитирования: Маслобоев А. В. Триадная концептуальная модель жизненного цикла управления жизнеспособностью критических инфраструктур // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 119–134. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-12

Introduction

Critical infrastructure is the interconnected networks of energy grids, transportation systems, water treatment facilities, and communication networks forms the foundational backbone of modern society, national security, and economic prosperity. These systems are increasingly exposed to a complex and escalating spectrum of threats, ranging from acute shocks like natural disasters, cyber-attacks, and geopolitical incidents to chronic stresses such as climate change, aging assets, and operational obsolescence. The inherent interdependency of these infrastructures means that the failure of a single node can trigger cascading effects, amplifying disruptions far beyond their point of origin and threatening societal stability.

Crisis management and safety paradigms, which are often predicated on probabilistic risk assessment and static protective measures, are proving insufficient to address this new reality. These approaches tend to be reactive, focused primarily on hardening assets against a limited set of anticipated threats, and often lack the adaptive capacity to evolve in the face of novel, unforeseen, or exponentially growing challenges. The core problem, therefore, transcends mere protection; it is the problem of ensuring systemic resilience is the ability to anticipate, prepare for, adapt to, withstand, and rapidly recover from disruptions in a dynamic and uncertain threat environment.

This gap between conventional practices and contemporary needs requires a fundamental shift in management philosophy. The central problem this research work addresses is the absence of a unified, dynamic, and cyclic framework for resilience management support that explicitly integrates the three main indispensable temporal dimensions of system resilience: (1) proactive anticipation of disruptive events; (2) operational absorption of impacts during these events, and (3) transformative adaptation following events to foster learning and improvement of the system situational control.

Consequently, the development of a triadic conceptual model of the critical infrastructure resilience cycle is presented as an urgent endeavor. This type of models is designed to formalize and orchestrate the continuous recurrent interplay between anticipation, absorption, and adaptation, transforming resilience and its situational management per se from a static goal into a dynamic, self-improving process.

Traditional risk management for critical infrastructures is often focused on response and recovery after a disruptive event and managed within a single sector like energy or transport. Meanwhile, the triadic conceptual models force a shift to a proactive, holistic mindset. By formally integrating anticipation, it mandates preparedness and planning before a disruption occurs. Its cyclical nature ensures that lessons from the absorption and adaptation phases continuously feed back to improve future anticipation, breaking down organizational silos. It is worth noting that disruptions are not single events, but processes with distinct phases: before, during, and after. Traditional models often focus on one phase (e.g., response) at the expense of others.

The triadic models allow fully overlapping the whole resilience cycle (anticipation-absorption-adaptation) and provide a structured conceptual framework to allocate resources, develop capabilities, and assign responsibilities for each phase explicitly. This ensures that preparedness is not neglected in favor of response, and that post-event learning is not lost, but is formally captured to drive further system evolution.

A system that only withstands shocks, but does not learn from them is doomed to repeat its failures. Static resilience is insufficient against evolving threats. The adaptation phase is the model's key innovation. It institutionalizes learning and systemic evolution. By formally analyzing system performance after a disruption, organizations can move from simply "bouncing back" to "bouncing forward", notably, becoming smarter, more robust, and more adaptable than before. This creates a learning loop that is essential for long-term survival. Modern critical infrastructures are systems of systems. A failure in the power grid can crash telecom networks, which can disable financial systems and hinder emergency response. A holistic triadic conceptual model requires cross-sector analysis. When designing for anticipation phase, analysts must map dependencies. During absorption phase, coordinated action across sectors is essential. Adaptation phase involves updating protocols and infrastructure across interconnected systems. This systemic view is the only way to prevent and manage cascading failures.

Limited budgets require strategic investment. Without a systemic model of the resilience management cycle, spending can be misallocated, e.g., over-investing in hardening assets (anticipation phase) while under-investing in response capabilities (absorption phase) or R&D for future threats (adaptation phase). The triadic conceptual model provides a rational framework for decision-making. It allows policymakers and CI operators to identify gaps in each phase, conduct cost-benefit analyses for resilience investments across the entire cycle, and justify spending on "soft" capabilities (e.g., training, exercises, data sharing) alongside "hard" infrastructure (e.g., sea walls, backup generators).

Resilience is often discussed qualitatively. Therefore, triadic conceptual models help to manage what is difficult to measure. A formal model, especially one with mathematical formalizations, allows for the development of metrics and KPIs for each phase, i.e.: time to detect a threat, redundancy levels, preparedness scores (for the anticipation phase); minimum operating capacity, time to stabilize, performance loss (for the absorption phase); time to full recovery, percentage improvement in performance post-upgrade (for the adaptation phase). This enables objective assessment of resilience and holds organizations accountable for their performance throughout the cycle.

Resilience involves multiple stakeholders: government agencies, private critical infrastructure owners, first responders, and the public. Confusion in roles leads to chaos during a crisis. The triadic conceptual model serves as a coordination tool. It creates a common language and a shared mental model for all stakeholders. It clearly defines who is responsible for what actions in each phase, streamlining communication and collaboration before, during, and after a disruptive event.

Engineering and analyzing triadic conceptual models for management support of the critical infrastructures resilience cycle is not merely an academic exercise. It is a strategic imperative for national security, economic stability, and public safety. The importance stems from the severe limitations of traditional approaches and the unique advantages triadic models provide in addressing the complex nature of modern threats. In essence, triadic conceptual models transform resilience management from an informal, reactive practice into a formal, continuous, and proactive discipline. It is the difference between fragility (breaking under stress), robustness (resisting stress, but potentially breaking under unexpected stress), resilience (bending, but not breaking, and then recovering), and antifragility (the goal of the triadic cycle is becoming stronger and better adapted because of the stressors and disruptions encountered). For the critical infrastructures that underpin our way of life, achieving this antifragile state is not optional. It is essential. The triadic conceptual models provide the blueprint to shift from original fragility paradigm well-approved in safety sciences to the novel antifragility philosophy in resilience studies.

This ongoing research work articulates the problem space of modern critical infrastructure vulnerability, delineates the limitations of extant management models, and formally introduces the triadic conceptual model as a necessary, holistic framework for governing resilience throughout the entire life-cycle of a disruption: before, during, and after an adverse event to ensure the resilient functionality and performance of the vital services upon which society depends. Sequentially, this study is an expansion and adaptation of the earlier research results [1–3] drawn in the field of regional security and critical infrastructure resilience management information and analytical support.

Material and methods

The background of this work is based on the related research materials of domestic and foreign studies which contributed to the advancement of the modern theory and practice of ensuring reliability, stability,

security of complex systems and risk management in general [4–10], as well as to solving problems in the field of developing models, methods and technologies for situational management information support of critical entities and infrastructures [11–26].

The methodology used in this research is based on the systems analysis of various events, factors, processes, cause-and-effect relations in the field of studying the domain, subject and context of this work, evaluation of the collected information, comparative and contrastive analysis, as well as conceptual modeling of the research object (resilience management cycle and resilience in tote).

The carried out content-analysis of domestic and foreign scientific literature in the examined research domain showed that most of the studies focus on considering general methodological issues of developing the resilience concept and solving specific problems of situational management at individual phases of the system resilience cycle in various sectors of critical infrastructures. These studies propose approaches to the analysis, modeling and indicator-based assessment of the performance indices of individual elements and phases of the critical infrastructures resilience cycle based on the preventive security analytics tools, risk management, scenario and expert methods of decision support for managing the resilient functioning of given class of systems. At the same time, issues related to the automation of poorly formalized phases of the resilience cycle, including the initiation and progression of critical situations, risk anticipation and threat absorption, adaptation to the consequences of initiating events, as well as the organization of end-to-end resilience situational management and the lack of any generally accepted normative document (e.g., an official agency-level standard) regulating the development and relevant choice of tools for situational management of critical infrastructures resilience in accordance with a particular life-cycle model (scenario) of the propagation of initiating events caused by external or internal impacts on the elements and critical functions of these systems, remain insufficiently developed from a scientific point of view. Known approaches to the structural analysis and formalization of the resilience management cycle of critical infrastructures [12–26] are generally characterized by high abstractness due to the lack of formal conceptual models that take into account the specific features of ensuring the resilient functioning of critical infrastructures at various phases of situational control, as well as insufficient complementarity due to the lack of a clearly defined conjugation with the adopted classifications of potential accident facilities, critical entities and infrastructures (technical-organizational aspect).

Due to the imperfection of the regulatory and methodological base in the field of situational management of the critical infrastructures resilience, each agent of management (security agency, owner of a critical facility, operator of a situational center, etc.), responsible for ensuring the stable functioning of critical infrastructures, are forced to solve these problems at different phases of the system resilience cycle by their own efforts and means, guided by local acts, directives and their own regulations, which is not always well-founded, reasonable and effective in the conditions of the onset of complex dependent failures that generate chains of adverse, including unexpected events that initiate abnormal and emergency situations in the system. A unified representation of the resilience cycle of critical infrastructures using formal conceptual models is designed to improve the consistency and overall efficiency of the situational management of these complex systems via automated processing and analysis of expert knowledge about the static and dynamic characteristics of the safety and resilience of critical infrastructures elements and their interrelations comprised in these models in order to identify the potential for such initiating events.

The conceptual and categorical apparatus of the study comprises the following concepts and definitions [27, 28].

Vulnerability is considered as a characteristic of an element of the critical infrastructure design, implementation, or operation that renders it susceptible to disruption or destruction by a threat and includes dependencies on other types of infrastructure. In other words, it is an indicator of direct risks and an intrinsic property of something resulting in susceptibility to a risk source that can lead to the occurrence of hazardous events with negative consequences for the critical infrastructure elements making it act adversely. Threat is a potential cause of an unwanted incident in critical infrastructures, which can result in harm to a system in the large, individuals or critical entities, the environment or the society.

A disruptive event (syn.: disturbance, adverse/undesired event, etc.) is a singular instance of a phenomenon negatively affecting a system (critical infrastructure/entity) or its critical functionality which refers to the ability of a system to provide predetermined essential functions. Disruptions lead to negative consequences and decrease of performance. This implies that there is an actual (i.e., non-zero) exposure to the event and that the system is not able to fully resist or absorb its impact. Disruptive events comprise all potential causes and risk sources of a loss of functionality of the critical infrastructure system, i.e.: natural hazards, technical failures, human errors, extreme loads, and organizational issues, intentional malicious attacks, etc.

A cascading failure or effect occurs when a disruption in one infrastructure causes the failure of a component in another infrastructure or asset, which subsequently causes a disruption in another infrastructure. Cascading effects are the impacts of an initiating event. An initiating (triggering) event is the first in a sequence of natural, accidental or intentional events that may affect one or several infrastructure systems.

An incident is a chain of disruptive events affecting multiple systems or its elements either in series or spreading in parallel. Incident management is the management of appropriate measures to deal with a potential emergency situation characterized by high complexity, uncertainty and time pressure that could lead to possible large scale damages and requires a specific organization and coordination to ensure the restoration of the critical situation.

Generally, emergency means any critical situation which has or may have an adverse impact on people, the environment or property and which may result in a call for assistance and protection. Crisis is a high level emergency situation in critical infrastructure with high uncertainty that disrupts the core activities and/or credibility of critical entities and requires urgent preventive and reactive actions. Crisis management involves all processes (analysis, prevention, and preparation response plans for known and expected critical situations/scenarios) which aim at repelling the emergency and reducing the impact of crises and disasters. Crisis and resilience management are very similar to each other in recurrent nature of the system situational control and monitoring procedure.

Disaster is a serious disruption of the functioning of a community or a society involving widespread human, material, economic or environmental losses and impacts, which exceeds the ability of the affected community or society to cope using its own resources. Disasters are often described as a result of the combination of: the exposure to a hazard; the conditions of vulnerability that are present; and insufficient capacity or measures to reduce or cope with the potential negative consequences. Disaster impacts may include loss of life, injury, disease and other negative effects on human physical, mental and social well being, together with damage to property, destruction of assets, loss of services, social and economic disruption and environmental degradation.

For simplicity, upon further discussion the concepts critical/emergency situation, disruptive event, initiating event being used will be identified.

The types and criteria of initiating events and emergency situations occurring in critical infrastructures are considered in detail in the research works [11, 29–32].

All types of initiating events (critical situations) have one important detail in common: the initiation process of each of them is hidden (non-obvious) in its matter and, as a rule, begins under normal conditions as a result of accumulation of contradictions, sources of threats, defects and gradual degradation of the system.

Based on the progression and propagation dynamics initiating events in critical infrastructures can be conditionally classified as follows [2, 28]:

- the slowly progressing initiating events are critical situations when there is a sufficiently large float time for adoption and implementation of preventive and reactive measures to mitigate the consequences of destructive impact of such events on the system;
- the rapidly progressing initiating events are critical situations, the rate of intensification and spread of which is limited, that provides a float time for making and implementing the managerial decisions aimed at stabilizing the system or reducing the damage caused;
- the instantaneous initiating events when there is no float time for making operational decisions on situational management.

The sudden-onset disruptive event is a disruption whose intensity builds up instantaneously (e.g., an earthquake or a tidal flood). The slow-onset disruptive event is a disruption whose intensity increases over a longer period of time (e.g., deterioration of components or increasingly harsher conditions due to climatic changes). Meanwhile, a slow-onset disruptive event can still lead to a sudden collapse of performance (e.g., when approaching a bifurcation or tipping point). Whether the onset of a disruptive event is considered slow or fast should depend on the time-scale of the considered critical infrastructure system, i.e., if the intrinsic dynamics of the system are faster than the emergence of the event, the event should be referred to as slow-onset [28].

Each of the listed classes of initiating events may be followed by cascading effects due to the interdependence of critical infrastructure systems and their elements. Rapidly progressing and instantaneous critical situations are the most typical for most modern critical facilities, entities and infrastructures. For effective situational management of such events at all levels of decision-making (strategic, tactical and operational), appropriate methods and tools of information and analytical support are required.

Reviewing the known definitions of resilience concepts and its usage for critical infrastructure systems, it should be noted that three backbone resilience capacities (absorptive, restorative, and adaptive) are at the center of the systems-of-systems approach to analyzing and managing critical infrastructures subject to their interdependencies, and are linked with the various stages of typical critical infrastructure response cycle to disruption (before, during and after the disruptive event). In terms of the systems approach a resilience cycle corresponds a conceptual sequence of phases in the unfolding of a disruption, in which some capacities and actions are more important than others (see resilience phases in Fig. 1).

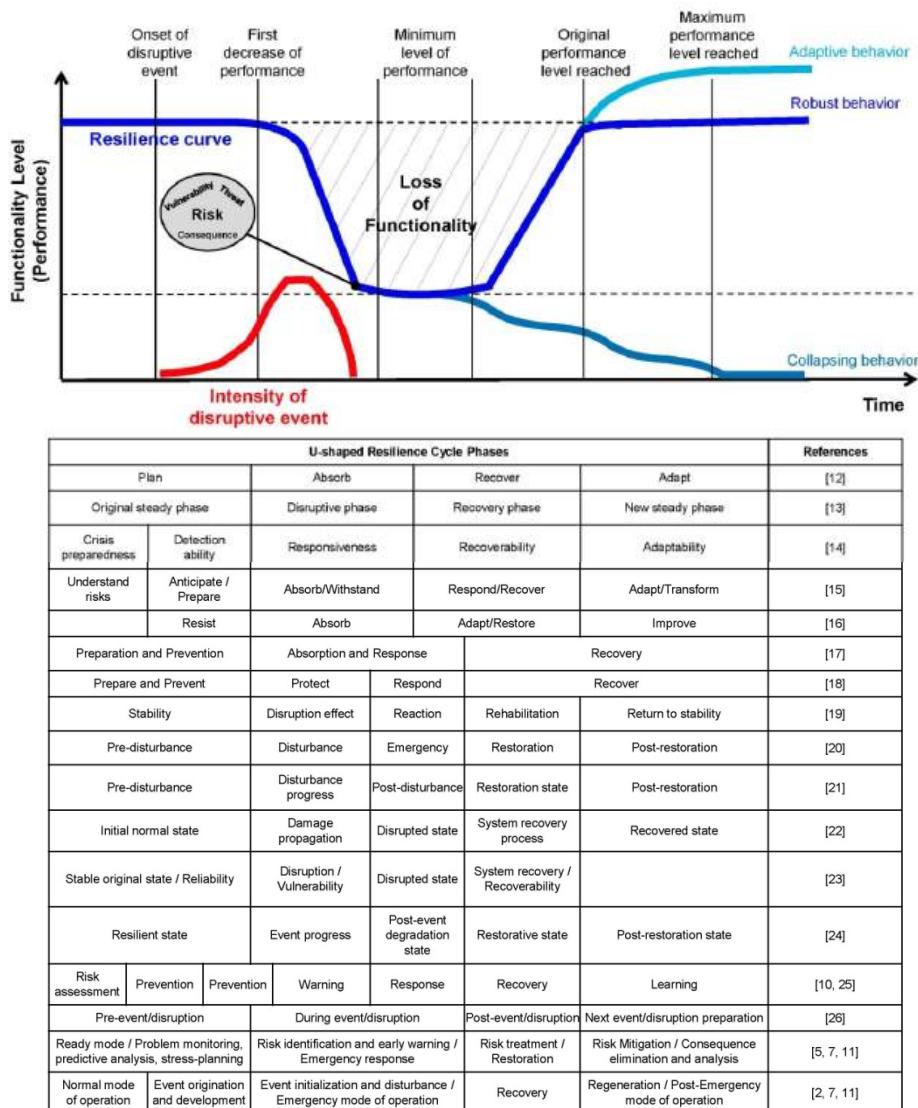


Fig. 1. Critical infrastructure resilience cycle and its main phases across domestic and foreign studies using the performance curve (adopted and extended from [28])

Typically, it includes a anticipation/preparation/prevention phase, an absorption/response phase, a recovery phase. After the recovery phase, an adaption phase might take place, during which the system learns from the disruption and integrates the lessons learned, making it more resilient towards the next disruption. For simplicity, the resilience cycle assumes that disruptions do not overlap, and that the main effects of a disruption on the functioning of the system accumulate in a single, concise time span. It is clear, however, that the resilience capacities can only in part be mapped to the phases. For example, learning and anticipation are needed throughout the entire cycle, not only in their respective phases [28].

There is considerable variation in terminology concerning the different phases a system goes through during the unfolding of a disruption. A popular way to illustrate this resilience cycle is via an idealized performance curve, which typically starts shortly before a single disruptive event and ends after the system has recovered from the associated impacts. The curve is conceptually divided into successive phases, which are

named differently depending on the domestic and foreign studies (Fig. 1). Most authors name the phases in accordance with the resilience process that typically takes place during that time. Some refer to the resilience capacity that is thought to be most important during the corresponding time period. Others distinguish the phases based on the current state of the system or the progression of the disruption [28]. Despite all these differences in the naming, among researchers using the performance curve for illustrative purposes, there is a consensus on the general order and duration of the phases (Fig. 1), i.e., the start and end time points of the phases are largely consistent across studies. As noted in [28], other ways to conceptualize the succession of resilience-constituting phases or processes exist, especially among frameworks which emphasize a system's ability to adapt. Notable examples in this regard are the Holling adaptive cycle [8] and the approach proposed in [33, 34] which comprises the recursive phases of sensing, anticipating, adapting, and learning.

Results and discussion

At present, various information and analytical support tools aimed at preparing guidelines for decision-makers are being developed for effective situational management of critical facilities, entities and infrastructures. Recommendations are usually elaborated through scenario analysis and forecasting possible variants of disruptive event propagation in these systems and aggregation of heterogeneous operational and historical data retrieved from various sources. These actions are performed on the basis of certain formal models that allow to study the structure and capacities of the controlled objects, as well as to describe the functions and relationships between the elements of the situational management system and the processes progressing in it. Such formal models serve as an intermediate between the mental representations of experts in problem domain and the developed management information technologies and allow to fully or partially automate the engineering process of the proper software tools for decision-making support.

From the process approach [35] point of view, the situational management cycle of the critical infrastructure resilience under adverse events, emergency and abnormal situations can be described as an assigned sequence of performing certain control problems/functions, each of which corresponds to a specific phase of the resilience cycle. The cycle duration consists of the total time of the initiating event impact on the system and its adaptation to new operating conditions. The cycle is an iterative process (transition/recurrence of initiating events and operating scenarios over time), during which certain types of resources are consumed to restore the normal operability of the system after a failure or destructive impact of external factors, and a related set of functions and operations grouped by a certain attribute/criterion and aimed at increasing the adaptive capabilities of the system are implemented. In this case, for each cycle phase a subprocess, source materials and information, executive agents, regulations and process execution procedures, as well as its outputs are assigned. The time schedule for implementing the situational management functions of system resilience describes the time frame and sequence of the operations and program activities defined at the appropriate resilience cycle phases of the system, and is represented in the form of a network structure as a rule. Then, in general, a system resilience cycle model is understood as a structured graphical description of a network of interconnected processes and/or functions/operations that reflect the logical structure and technical-organizational aspects of system functioning, as well as the mechanisms of interaction between agents and objects of resilience situational management.

In this interpretation, the formal model of the system resilience cycle can be represented as a graph of control functions aimed at maintaining and supporting the resilient functioning of the system when an initiating event occurs:

$$RLC = G(CF^i, cf_0, cf_e, E, S, ES, ECF, R, ER),$$

where $CF^i = \{cf_{ij}\}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$ is a set of nodes (resilience management cycle phases), each of which corresponds to the one or more resilience control functions $cf_i = \{cf_{ij}(r_{ij}, t_{ij})\}$, depending on the resources r_j and the time t_j necessary for its implementation; n is the number of cycle phases which in the most simple and general case is equal the number of control functions m implemented at the i -th phase of system resilience cycle. Then, $RLC = \bigcup_{i,j=1}^{n,m} \{cf_i\}_i$ is a process which comprises a set (composition) of control functions; cf_0 and cf_e are the input (e.g., "Monitoring" or "Understand risks" phase) and output (e.g., "Learning" or

“Evaluation” phase) nodes, respectively; E is a set of control edges, such that $\forall j,k \in CF \cup \{cf_0, cf_e\} : (j,k) \in E$, if a situation is possible when the control function j will be performed after the control function k is performed; S is a set of nodes corresponding to the agents/entities of resilience situational management, performing certain functions within the resilience cycle phases ($S \cap CF = \Omega$, where Ω is an empty set); ES is a set of subordination edges, such that $\forall j,k \in S : (j,k) \in ES$, if the agent of management k is subordinate to the agent of management j ; ECF is a set of function performing edges, such that $\forall j \in S, k \in CF : (j,k) \in ECF$, if the control function k can be performed by the agent of management j ; $R = \{r_q(Vol, Typ, C)\}, q = \overline{1, l}$ is a set of resources different types necessary for the support and implementation of resilience management cycle phases; Vol is the volume of the q -th resource available for the implementation of preventive measures when managing the critical situations that have arisen; Typ is the type of the q -th resource; C is the cost of a unit of the q -th resource; ER is a set of weighted edges of resource use such that $\forall j, k \in R, k \in CF : (j, k) \in ER$, if the control function k when performing uses the resource j during allotted period of time (the weights are assigned by experts).

An independent phase of the process (resilience cycle) which is represented as a composition of control functions, is illustrated in Fig. 2 and can be formally written as follows:

$$cf_i = f(IN^R(CF), OUT^R(CF), t),$$

where $IN^R(CF)$ is a set of input resources of the process implementing the i -th composition of control functions; $OUT^R(CF)$ is a set of output resources of the process implementing the i -th composition of control function; t is the time required to perform the i -th composition of control functions.

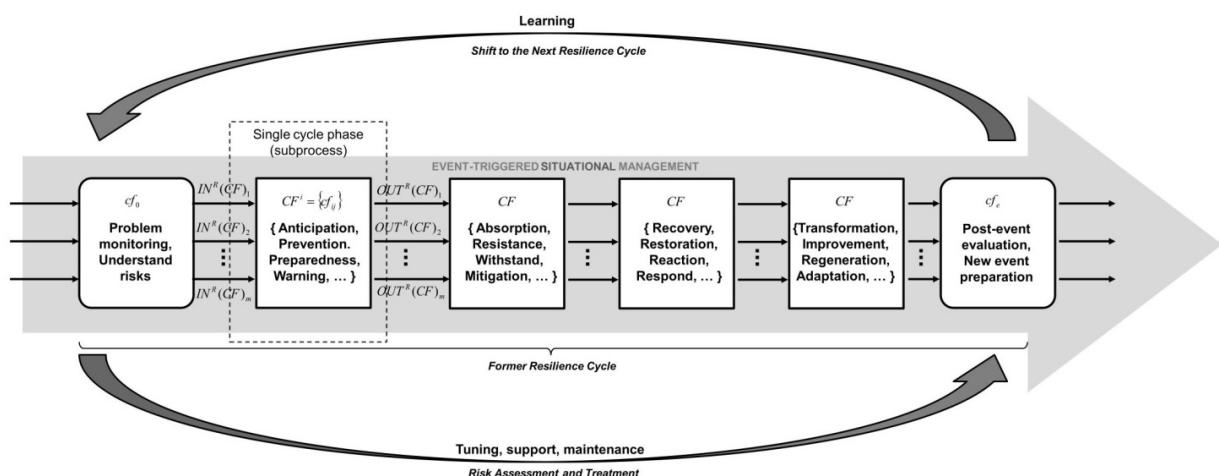


Fig. 2. A schematic illustration of the phased system resilience control cycle in the context of process approach

The system model of the critical infrastructures resilience cycle is intended for the conceptual description and subsequent analysis of the system resilient functioning phases (risk anticipation, impact absorption of the actuating threats, recovery, and adaptation) in the conditions of origination and propagation of critical situations occurring in these infrastructures, as well as for identifying the causes of initiating events. The use of the system model allows identifying and typifying the current phase of the critical situation progression, assessing the resource costs for the implementation of preventive and reactive measures at this phase depending on the selected management scenario, and provides also the possibility to predict its dynamics at a qualitative level in the specified operating conditions. The formalized representation of the resilience situational management cycle when an adverse event occurs in critical infrastructure facilities is based on the adoption and applied adaptation of the regional security conceptual model developed in the course of previous studies [1, 2] to the formal description and analysis of the process and modes of operation of this class of systems in the context of its resilience.

According to studies [6, 36], from the point of view of systems analysis, the conceptualization and definition of the concept of a system is based on ternary relations or triads as three-element sets. A triad reflects in some way the systemic law of the world structure: any triad comprises an infinite number of triads; on the other hand, it can expand infinitely, since each triad is located inside an even larger triad. Systemic triads are formed by three elements of the same level, each of which can serve as a measure of the combination of the other two. Based on the triadic approach, the methodology for managing the critical infrastructures resilience, by analogy with the methodology for ensuring the safety of complex organizational objects proposed in [6], can be considered in three ways [6]:

- as a study of the sledding process towards a goal, i.e. the generation and connection of triads that form the situational management cycle of the critical infrastructures resilience;
- as a study of the systemic logical organization of actors, entities, technologies and means necessary to achieve the objective: ensuring the resilient functioning of critical infrastructure elements, i.e. maintaining their resilience in the event of critical and emergency situations through effective situational management;
- as a study of the new knowledge producing and acquisition process based on existing approaches in the field of safety and security of complex systems, i.e. designing an integrated conceptual framework that combines methods and tools of information and analytical support used at different phases of the resilience cycle.

Therefore, to design a conceptual model of the resilience cycle of critical infrastructures, it is proposed to use a triadic approach to conceptual modeling of complex processes and systems [5, 36]. The apparatus of triadic network models provides a visual representation and formalization of knowledge about the target, structural, and dynamic operating characteristics of complex entities, possible scenarios and outcomes of the appropriate systems and processes behavior. The triadic approach is well-used to model the life-cycle of complex control objects of various natures, since it takes into account the cyclicity characteristics of the system/process functioning and development.

Next, a ternary conceptual framework of the resilience situational management cycle of the critical infrastructures shown in Fig. 3 will be designed and discussed. Each of the phases of this cycle considered above will correspond to its own triad. The triadic conceptual model of the critical infrastructures resilience cycle consists of a set of interconnected submodels, each of which is represented as a triad – a graph with three nodes. The nodes correspond to the sets of objects of the model, and the edges – the relationships of different types (e.g., functional, structural, etc.) between them. If necessary, the ends of the triads can be connected to each other, forming new triads. Such a model representation is suitable and visual for the system analysis of situational management processes and scenarios of the critical infrastructures resilience under initiating of disruptive events.

Optimization of the entire process of situational management consists in the sequential design of an effective system for ensuring the resilient functioning of critical infrastructures for all phases of the resilience cycle based on the analysis, improvement and development of each triad.

As follows from Fig. 3, the situational control cycle of the critical infrastructures resilience is ultimately represented in the form of a gradual expansion of triads nested within each other and forming an integrated holistic triad in the form of a hierarchical system. The given number of levels is not exhaustive. Triads can be expanded by supplementing with various resilience characteristics depending on the type of critical infrastructures under examination, the event-driven scenario and/or the problem situation context, the selected criteria, measures and dimensions of resilience, as well as the methods and tools of information and analytical support used at the appropriate levels of situational management.

When forming triads, the following requirements must be met and fulfilled [5]:

- the components of triads must be interconnected by some relation (e.g., by activity category or by functional dependence);
- the components of triads must be adequate and relevant to each other, i.e., fit to each other by some principle and be mapped onto each other.

The first triad (T_1) expresses the needs for elimination and mitigation of the disruptive event that has initiated or the threatening source of its occurrence in the functioning process of critical infrastructure. In this case, there is a set of needs N associated with the elimination and mitigation of a set of initiating events DE . For it, a set of strategies S for implementing preventive and reactive measures to mitigate the negative impact on the system elements and functions of a set of initiating events DE , i.e. to satisfy the needs N , is determined. In this case, one set can be mapped onto another:

$$\begin{aligned} \mu_0 : N \rightarrow DE \\ , \\ \mu_1 : N \rightarrow S , \\ \mu_2 : S \rightarrow DE . \end{aligned}$$

The inverse mapping is also possible, e.g.: $\mu_2^{-1} : DE \rightarrow S$.

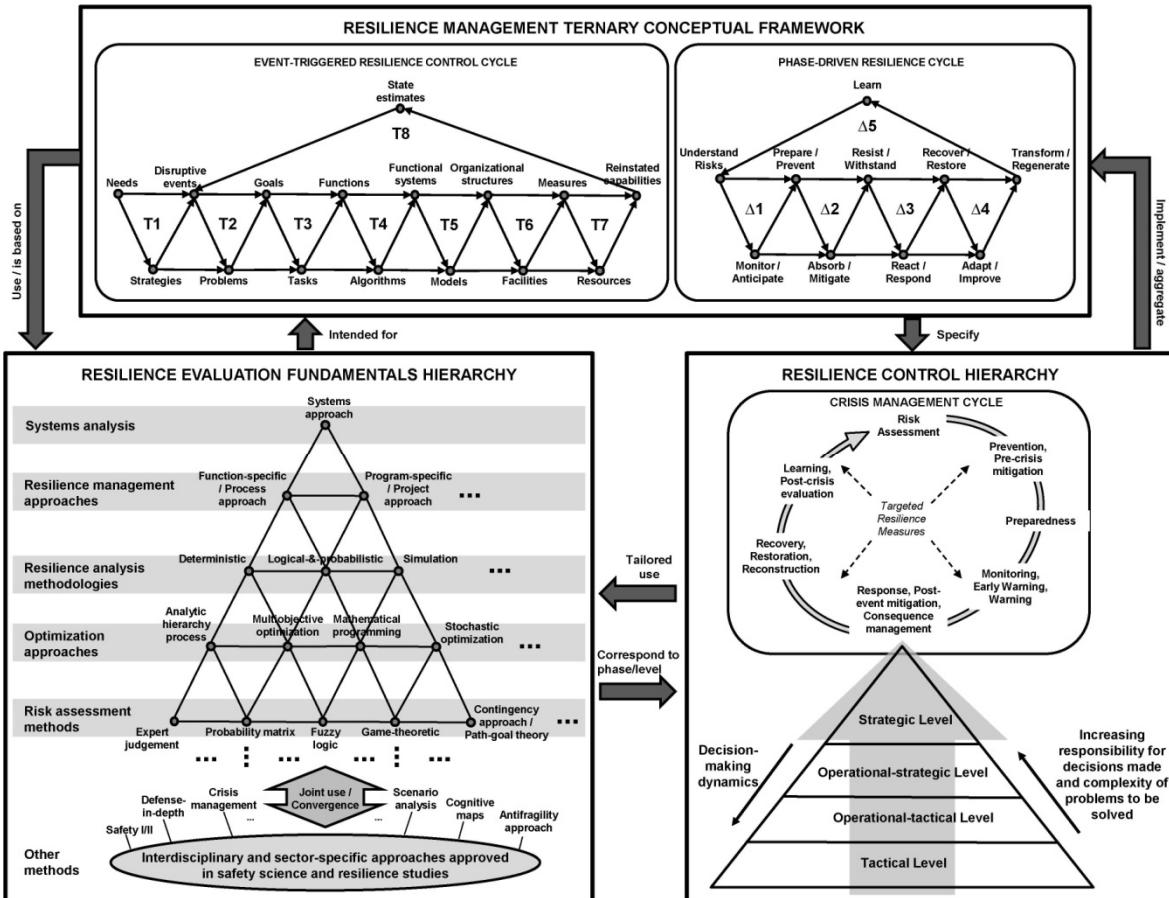


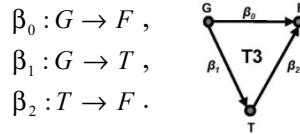
Fig. 3. Resilience cycle ternary conceptual framework for managing disruptive events in critical infrastructure systems

The second triad ($T2$) forms on the basis of the set DE a set of goals G associated with the elimination and mitigation of initiating events, and the set of problems P that must be solved in order to achieve the set of goals G . Basically, the process of generating the first two triads is poorly formalizable and is implemented on the basis of empirical data and expert knowledge, which are often enclosed in expert systems. The complexity of synthesizing the set of goals G , reflecting the set DE , lies in the fact that the global goal of the control system is hierarchical, dynamic, and the priorities of individual subgoals can change in an unforeseen way when managing the progression and propagation of initiating events, which also largely depends on the nature of the during and post event consequences at each phase of the system resilience cycle:

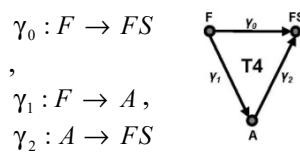
$$\begin{aligned} \alpha_0 : DE \rightarrow G \\ , \\ \alpha_1 : DE \rightarrow P , \\ \alpha_2 : P \rightarrow G . \end{aligned}$$

The third triad ($T3$) moves up the set of goals G into a set of functions F that must be performed in order to achieve the assigned management goals for eliminating and mitigating the consequences of disruptive events. The specification of the set of goals G is carried out through the generation of a set of tasks T that reflect subgoals in qualitative and/or quantitative terms, as well as in spatio-temporal terms. The set of functions F that must be performed to eliminate and mitigate initiating events comprises the functions of problem monitoring,

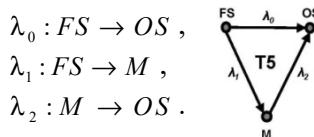
operational planning, prediction, warning, handling, decision-making, treatment, adjustment, state diagnostics and analysis of critical infrastructure facilities, as well as scenario analysis of the progression and propagation of disruptive events, effectiveness assessment of the implemented preventive and reactive measures (control over the execution of adopted managerial decisions), estimation of costs, resource needs, etc.:



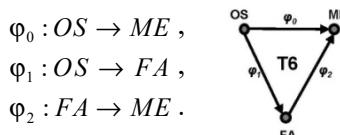
The fourth triad ($T4$) represents the need to determine an adequate set of functional systems FS (forces and means of ensuring the system resilience) for the implementation and launching of a set of functions F when a disruptive event occurs. In this case, each functional system must have a certain structure that reflects the control algorithm it implements (a set of actions, competencies, etc.). Thereby, the problem of synthesizing a set of control algorithms/programs A and choosing such an algorithm that will best allow the resilience situational management system to perform the appropriate function in terms of the selected efficiency criteria for each phase of the resilient system functioning cycle arises. In this case, the functions F can be performed both in automatic and automated modes:



The fifth triad ($T5$) maps the set of functional systems FS onto the set of organizational structures for resilience situational management OS (compositions of elements of the set FS) through the set of models M of these compositions. Each model (specification) of the functional system configuration represents specific elements of its composition: agents/entities of resilience management (individual actors or even entire organizations), resources, means, technologies, costs, needs, restrictions, etc. The problem of choosing a configuration model for given conditions is formalized on the basis of configuration optimization according to the selected efficiency criteria:

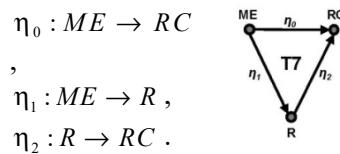


The sixth triad ($T6$) maps the set of organizational structures OS configurations of functional systems (a set of interconnected management agents/authorities united by a common goal/task) onto a set of preventive and reactive measures ME that must be implemented using a set of available facilities and assets FA . When solving the problem of selecting forces and means, it is necessary that it be consistent and compatible not only with the capabilities of the functional system FS and the competencies of the organizational structures OS (agents of management) using it, but also with the nature of the initiating event itself, as well as the features of the measures being implemented to counteract its further progression and destructive impact on the system:

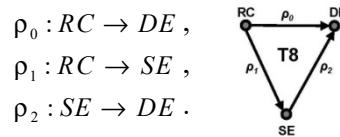


The seventh triad ($T7$) forms a set of new states of the disruptive event propagation process (reinstated capabilities of the system) RC based on a set of implemented preventive and reactive measures ME . In this case, a shift to the next event and new operating scenario (regeneration and adaptation of the system) occurs. These new states turn out as a result of targeted control actions on the initiating event progression process by using a set of available resources R to manage the critical situation. In this case, the set of resources R is selected both based on the situational management requirements by “just in time” principle taking into account spatio-temporal and other constraints in order to move the system from a critical state to a stable one, and based on the requirements for reducing the risk of a new critical event initiation. This process is a direct

control of disruptive event, which consists in the targeted transition of a critical situation or a threatening source of its initiation from one (critical) state to another (stable):



The eighth triad (*T8*) maps the set of new situations *RC* onto the set of previous disruptive events *DE* through the set of new state estimates *SE*, characterizing these situations for each phase of the resilience cycle. The set of state estimates *SE* allows judging the effectiveness of the preventive organizational and administrative measures taken to eliminate the threats of progressing new disruptive events in the system. The effectiveness estimation is carried out according to a scalar or vector criterion, characterizing the proximity of a disruptive event to a situation with the required (desired) level of system resilience:



The integration of the generated triads into a unified system conceptual model is shown in the top of Fig. 3. Elements of the lower-level sets can be also connected to each other. In this case, new triads are formed, which are the objects for further systemic research and analysis.

Thus, the management processes formalization of the critical infrastructures resilience under sudden failures and adverse initiating events in the form of a triadic conceptual model provides the possibility of integrating into a holistic system the main preventive activities of management agents and entities implemented at different phases of the resilience cycle and associated with these processes. At the same time, the proposed model provides a basis for analyzing and assessing the effectiveness of the selected program of anti-crisis measures to achieve the global goal of situational management of the system resilience: minimizing the risks of critical situations and mitigating their consequences to maintain the resilient functioning of the system.

In fine, let's discuss several challenges and limitations of triadic conceptual models intended for system resilience cycle analysis and management support. First of all, when building such type of models, we meet complexity in modeling and accounting interdependencies. Critical entities and infrastructures are deeply interconnected (e.g., power grid failure disrupts water treatment and communications). Accurately modeling these complex dynamic feedback loops within and between the all resilience cycle phases is extraordinarily difficult. A change in one part (triad) of the model can have unforeseen consequences elsewhere when making decisions under situational control. In addition, efficient use of such models is heavily dependent on historical and on-line data, as well as its quality. For instance, adequate modeling of the anticipation phase requires threat intelligence and predictive data, while absorption phase requires real-time operational data, and adaptation phase requires historical performance and failure analysis data. Integrating, representing and accounting these disparate data from various sources, often in different formats, within a triadic conceptual model and ensuring their quality and timeliness is a massive technical and logistical undertaking.

The absorption phase requires rapid analysis of incoming data during a high-stress, time-critical event. Developing simulation models and automated decision-support systems on the basis of triadic conceptual frameworks that can quickly synthesize information and provide actionable recommendations to operators is extremely challenging. Meanwhile, testing the resilience cycle through simulations (e.g., digital twins) requires simulating not just the physical infrastructure, but also human operators, organizational procedures, and external threats. Creating these high-fidelity multi-domain simulations is resource-intensive, but the resources are finite both computational, and financial. At once, a core challenge is optimizing the investment in resilience maintaining facilities across the all resilience cycle phases. Quantifying the return on investment for proactive resilience measures is notoriously difficult, because their value is only realized if a disruptive event occurs. The anticipation phase relies on predicting low-probability, high-impact events ("black swans" or "gray rhinos"). The inherent uncertainty in these predictions can lead to either under-preparation or costly over-preparation for scenarios that never materialize. Thus, investments in anticipation and adaptation (e.g., upgrading critical entities/infrastructure for a future earthquake) have high upfront costs with long-term,

uncertain benefits. This creates a misalignment with quarterly earnings reports or political terms, making it hard to secure sustained funding and commitment.

Safety systems oriented to critical infrastructure protection are rarely designed from scratch. Implementing a triadic conceptual model often means retrofitting it onto legacy safety systems that were designed for managing reliability, not resilience. These legacy safety systems may lack the sensors for monitoring (hindering absorption phase) or the modularity for easy upgrades (hindering adaptation phase). Unlike reliability or risk, which has more established and well-defined metrics, resilience is a multi-dimensional property. Thereat, another problem consists in quantitatively measuring the ability of a system to adapt or its capacity to anticipate, if it is really possible. Developing meaningful, universally accepted key performance indicators for each phase of the resilience cycle and fully accounting it within a triadic conceptual model is a major hurdle.

Unlike more mature fields (e.g., environmental safety, cybersecurity, etc.), there are no universally accepted standards for formally establishing and implementing a critical infrastructure resilience management cycle. This lack of standardization perfection makes it difficult to compare practices, share lessons learned, and develop best practices across industries. Besides, defining clear accountability and responsibility for each phase of resilience management cycle within a complex, interconnected system like critical infrastructure is legally and organizationally difficult. The need to take into account the influence of a human factor within the all phases and levels of resilience management cycle adds specificity to the considered problem agenda. Human factor in decision-making is subject to biases that directly undermine the used triadic, conceptual, simulation and other classes of resilience management cycle models. Therefore, all these factors mentioned above should be implemented within the state-of-the-art conceptual models and frameworks which form the methodological basis for resilience cycle management support of complex dynamic systems such as critical infrastructures and critical entities.

Conclusion

The application of the triadic approach to studying the issues of the situational management of critical infrastructures resilience allows a systematic approach to the problems of modeling, analysis and automation of this cyclic iterative process, namely, to generate the sequence of triads related to each other and aimed at achieving the ultimate goal – designing an efficient decision support system to maintain the resilient functioning of critical infrastructures under the impact of multiple threats and the emergence of unforeseen events. The triadic conceptual model of the resilience situational management cycle of critical infrastructures built using the apparatus of ternary relations quite fully describes the hierarchical system of objects and methods for ensuring resilience at various phases of the cycle. Thus, the application of the triadic approach made it possible not only to systematically represent knowledge about the subject of inquiry: the resilience of critical infrastructures, but also expanding and supplementing the constructed triads to identify new properties and patterns inherent in this subject under examination. The following main results were drawn in the course of the study:

1. The issues of analysis, modeling and automation of the resilience cycle of the critical infrastructure systems based on the combined use of conceptual modeling technology, a process approach and a formal apparatus of ternary relations have been studied.
2. A diversification (expansion) of the application scope of the process and triadic approaches to the problems of formalization, analysis and modeling of the resilience situational management cycle of critical infrastructures has been proposed.
3. For the problem-solving of a comprehensive analysis of the critical infrastructure resilience cycle and the synthesis of effective models of technical-organizational systems for situational management of its resilient functioning, a triadic hierarchical model of the typical U-shaped resilience cycle of critical infrastructures based on a conceptual description of objects and ternary relations between them in the form of a set of triads and modeling the process of ensuring the system resilience at different phases of situational management has been developed. The proposed model has a multi-level structure and is distinguished by the completeness of the formal description of all phases of the system resilience cycle and the related processes of situational management, which provides the possibility of automation and variability of the choice of appropriate (relevant) measures and means for the effective maintenance of the stable functioning of the system under the influence of adverse or undesired factors.

The drawn results can find perspective application in the field of engineering automation of the ontological and simulation models of critical infrastructures resilience intended for subsequent use in the development and path planning process of intelligent information technologies for the situational management support of critical facilities and systems.

References

1. Putilov V.A., Masloboev A.V., Bystrov V.V. Modeling of regional security management processes. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2017;8(3-8):9–27. (In Russ.)
2. Masloboev A.V., Putilov V.A. *Informatsionnoye izmereniye regional'noy bezopasnosti v Arktike = Informational dimension of regional security in the Arctic.* Apatity: KNTS RAN, 2016:222. (In Russ.)
3. 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.
4. Severtsev N.A., Yurkov N.K. *Bezopasnost' dinamicheskikh sistem na etapakh zhiznennogo tsikla = Safety of dynamic systems at the stages of the life cycle.* Penza: Izd-vo PGU, 2023:568. (In Russ.)
5. Yamalov I.U. *Modelirovaniye protsessov upravleniya i prinyatiya resheniy v usloviyah chrezvychaynykh situatsiy = Modeling of management processes and decision-making in emergency situations.* Moscow: BINOM. Laboratoriya znanii, 2007:288. (In Russ.)
6. Vasil'yev V.I., Il'yasov B.G., Ivanova T.A. Methodology of ensuring security in complex organizational systems based on a triadic approach. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki = Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences.* 2014;(2):7–16. (In Russ.)
7. Shul'ts V.L., Kul'ba V.V., Shelkov A.B., Chernov I.V. *Stsenarnyy analiz v upravlenii geopoliticheskim informatsionnym protivoborstvom = Scenario analysis in the management of the geopolitical information confrontation.* Moscow: Nauka, 2015:542. (In Russ.)
8. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics.* 1973;(4):1–23.
9. De Marco A., Berardi D., Galuppi M., Lombardi M. Quantitative resilience assessment on critical infrastructures – A systematic literature review of the last decade (2014–2024). *Journal of Safety Science and Resilience.* 2025;6(3):100201.
10. Pursiainen C. *The Crisis Management Cycle.* UK, London: Routledge, 2017:194.
11. Tsygichko V.N., Chereshkin D.S., Smolyan G.L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur = Safety of critical infrastructures.* Moscow: URSS, 2019:200. (In Russ.)
12. Klimek P., Varga J., Jovanovic A.S., Székely Z. Quantitative resilience assessment in emergency response reveals how organizations trade efficiency for redundancy. *Safety Science.* 2019;113:404–414.
13. Nan C., Sansavini G., Kröger W., Heinemann H.R. A Quantitative Method for Assessing the Resilience of Infrastructure Systems. *Proceedings of the Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM12).* Honolulu, HI, USA, 2014;10:359–370.
14. Rehak D., Senovsky P., Slivkova S. Resilience of critical infrastructure elements and its main factors. *Systems.* 2018;6(2):21.
15. Jovanović A. et al. Assessing resilience of healthcare infrastructure exposed to COVID-19: emerging risks, resilience indicators, interdependencies and international standards. *Environment Systems and Decisions.* 2020;40(2):252–286.
16. Braun M., Hachmann C., Haack J. Blackouts, restoration, and islanding: A system resilience perspective. *IEEE Power Energy Magazine.* 2020;18(4):54–63.
17. Häring I. et al. Towards a generic resilience management, quantification and development process: General definitions, requirements, methods, techniques and measures, and case studies. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security.* Springer Netherlands, 2017:21–80.
18. Fischer K., Hiermaier S., Riedel W., Häring I. Morphology dependent assessment of resilience for urban areas. *Sustainability.* 2018;10(6):1800.
19. Taleb-Berrouane M., Khan F. Dynamic resilience modelling of process systems. *Chemical Engineering Transactions.* 2019;77:313–318.
20. Mishra D.K., Ghadi M.J., Azizivahed A. et al. A review on resilience studies in active distribution systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2021;135:110201.
21. Oboudi M.H., Mohammadi M., Rastegar M. Resilience-oriented intentional islanding of reconfigurable distribution power systems. *Modern Power Systems and Clean Energy.* 2019;7(4):741–752.
22. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M. et al. The Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review. *Energies.* 2021;14(6):1571.
23. Hossain N.U.I., Jaradat R., Hosseini S. et al. A framework for modeling and assessing system resilience using a Bayesian network: a case study of an interdependent electrical infrastructure system. *International Journal of Critical Infrastructure Protection.* 2019;25:62–83.
24. Panteli M., Mancarella P. Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events. *IEEE Systems Journal.* 2015;11(3):1733–1742.
25. Rød B., Pursiainen C., Reitan N.K. et al. Evaluation of resilience assessment methodologies. *Safety and Reliability – Theory and Applications: proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference (ESREL, June 18–22, 2017, Portoroz, Slovenia).* London, UK: Taylor & Francis Group, 2018:1039–1052.

26. Yang Zh. et al. Indicator-based resilience assessment for critical infrastructures – A review. *Safety Science*. 2023;160:106049.
27. Theocharidou M. et al. Final lexicon of definitions related to critical infrastructure resilience. *IMPROVER Project Report: Deliverable 1.3*. 2016:38.
28. Mentges A., Halkotte L., Schneider M. et al. A resilience glossary shaped by context: Reviewing resilience-related terms for critical infrastructures. *Disaster Risk Reduction*. 2023;96:103893.
29. Report of criteria for evaluating resilience. *IMPROVER Project Report: Deliverable 2.2*. 2016:37.
30. Rehak D., Hromada M. Failures in a critical infrastructure system. *System of system failures*. IntechOpen, 2018:75–93.
31. *Good Governance for Critical Infrastructure Resilience. OECD Reviews of Risk Management Policies*. Paris: OECD Publishing, 2019:118.
32. Urlainis A., Ornai D., Levy R. et al. Loss and damage assessment in critical infrastructures due to extreme events. *Safety Science*. 2022;147:105587.
33. Alderson D.L., Darken R.P., Eisenberg D.A. et al. Surprise is inevitable: how do we train and prepare to make our critical infrastructure more resilient? *Disaster Risk Reduction*. 2022;72:102800.
34. Park J., Seager T.P., Rao P.S.C. et al. Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems. *Risk Analysis*. 2013;33(3):356–367.
35. Kalyanov G.N. *Teoriya biznes-protsessov = Theory of business processes*. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom, 2023:296. (In Russ.)
36. Yuditskiy S.A., Vladislavlev P.N., Toch D.S. A triadic approach to modeling network-centric management systems. *Upravleniye bol'shimi sistemami = Management of large systems*. 2010;(28):24–39. (In Russ.)

Список литературы

1. Путилов В. А., Маслобоев А. В., Быстров В. В. Моделирование процессов управления региональной безопасностью // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8, № 3-8. С. 9–27.
2. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Ап-титы : КНЦ РАН, 2016. 222 с.
3. Maslbooev 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. Р. 130–156.
4. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 568 с.
5. Ямалов И. У. Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 288 с.
6. Васильев В. И., Ильясов Б. Г., Иванова Т. А. Методология обеспечения безопасности в сложных организационных системах на основе триадного подхода // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 2. С. 7–16.
7. Шульц В. Л., Кульба В. В., Шелков А. Б., Чернов И. В. Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством. М. : Наука, 2015. 542 с.
8. Holling C. S. Resilience and stability of ecological systems // Annual Review of Ecology and Systematics. 1973. № 4. Р. 1–23.
9. De Marco A., Berardi D., Galuppi M., Lombardi M. Quantitative resilience assessment on critical infrastructures – A systematic literature review of the last decade (2014–2024) // Journal of Safety Science and Resilience. 2025. Vol. 6, iss. 3. P. 100201.
10. Pursiainen C. The Crisis Management Cycle. UK, London : Routledge, 2017. 194 p.
11. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С., Смолян Г. Л. Безопасность критических инфраструктур. М. : УРСС, 2019. 200 с.
12. Klimek P., Varga J., Jovanovic A. S., Székely Z. Quantitative resilience assessment in emergency response reveals how organizations trade efficiency for redundancy // Safety Science. 2019. Vol. 113. P. 404–414.
13. Nan C., Sansavini G., Kröger W., Heinemann H. R. A Quantitative Method for Assessing the Resilience of Infrastructure Systems // Proceedings of the Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM12). Honolulu, HI, USA, 2014. Vol. 10. P. 359–370.
14. Rehak D., Senovsky P., Slivkova S. Resilience of critical infrastructure elements and its main factors // Systems. 2018. Vol. 6, № 2. P. 21.
15. Jovanović A. [et al.]. Assessing resilience of healthcare infrastructure exposed to COVID-19: emerging risks, resilience indicators, interdependencies and international standards // Environment Systems and Decisions. 2020. Vol. 40, № 2. P. 252–286.
16. Braun M., Hachmann C., Haack J. Blackouts, restoration, and islanding: A system resilience perspective // IEEE Power Energy Magazine. 2020. Vol. 18, № 4. P. 54–63.
17. Häring I. [et al.]. Towards a generic resilience management, quantification and development process: General definitions, requirements, methods, techniques and measures, and case studies // NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer Netherlands, 2017. P. 21–80.

18. Fischer K., Hiermaier S., Riedel W., Häring I. Morphology dependent assessment of resilience for urban areas // Sustainability. 2018. Vol. 10, № 6. P. 1800.
19. Taleb-Berrouane M., Khan F. Dynamic resilience modelling of process systems // Chemical Engineering Transactions. 2019. Vol. 77. P. 313–318.
20. Mishra D. K., Ghadi M. J., Azizivahed A. [et al.]. A review on resilience studies in active distribution systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 135. P. 110201.
21. Oboudi M. H., Mohammadi M., Rastegar M. Resilience-oriented intentional islanding of reconfigurable distribution power systems // Modern Power Systems and Clean Energy. 2019. Vol. 7, iss. 4. P. 741–752.
22. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M. [et al.]. The Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review // Energies. 2021. Vol. 14, № 6. P. 1571.
23. Hossain N. U. I., Jaradat R., Hosseini S. [et al.]. A framework for modeling and assessing system resilience using a Bayesian network: a case study of an interdependent electrical infrastructure system // International Journal of Critical Infrastructure Protection. 2019. Vol. 25. P. 62–83.
24. Panteli M., Mancarella P. Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events // IEEE Systems Journal. 2015. Vol. 11, № 3. P. 1733–1742.
25. Rød B., Pursiainen C., Reitan N. K. [et al.]. Evaluation of resilience assessment methodologies // Safety and Reliability – Theory and Applications : proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference (ESREL, June 18–22, 2017, Portoroz, Slovenia) / ed. by M. Cepin, R. Bris. London, UK : Taylor & Francis Group, 2018. P. 1039–1052.
26. Yang Zh. [et al.]. Indicator-based resilience assessment for critical infrastructures – A review // Safety Science. 2023. Vol. 160. P. 106049.
27. Theocharidou M. [et al.]. Final lexicon of definitions related to critical infrastructure resilience // IMPROVER Project Report: Deliverable 1.3. 2016. 38 p.
28. Mentges A., Halekotte L., Schneider M. [et al.]. A resilience glossary shaped by context: Reviewing resilience-related terms for critical infrastructures // Disaster Risk Reduction. 2023. Vol. 96. P. 103893.
29. Report of criteria for evaluating resilience // IMPROVER Project Report: Deliverable 2.2. 2016. 37 p.
30. Rehak D., Hromada M. Failures in a critical infrastructure system // System of system failures / ed. by T. Nakamura. IntechOpen, 2018. P. 75–93.
31. Good Governance for Critical Infrastructure Resilience. OECD Reviews of Risk Management Policies. Paris : OECD Publishing, 2019. 118 p.
32. Urlainis A., Ornai D., Levy R. [et al.]. Loss and damage assessment in critical infrastructures due to extreme events // Safety Science. 2022. Vol. 147. P. 105587.
33. Alderson D. L., Darken R. P., Eisenberg D. A. [et al.]. Surprise is inevitable: how do we train and prepare to make our critical infrastructure more resilient? // Disaster Risk Reduction. 2022. Vol. 72. P.102800.
34. Park J., Seager T. P., Rao P. S. C. [et al.]. Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems // Risk Analysis. 2013. Vol. 33, iss. 3. P. 356–367.
35. Калянов Г. Н. Теория бизнес-процессов. М. : Горячая линия. Телеком, 2023. 296 с.
36. Юдицкий С. А., Владиславлев П. Н., Точ Д. С. Триадный подход к моделированию систем сетцепентрического управления // Управление большими системами. 2010. № 28. С. 24–39.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования имени В. А. Путилова
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр
Российской академии наук»
(Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14)
E-mail: a.masloboev@ksc.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences,
associate professor,
leading researcher,
Putilov Institute for Informatics
and Mathematical Modeling
of the Federal Research Center
"Kola Science Center
of the Russian Academy of Sciences"
(14 Fersmana street, Apatity, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 06.06.2025

Поступила после рецензирования/Revised 30.06.2025

Принята к публикации/Accepted 07.07.2025