

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Абрамов О. В. ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ И ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	5
Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. РИСКИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	12
Прокофьев О. В. ГЕНЕЗИС РИСКОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	20
Старостин И. Е. КОРРЕКТНОЕ ЗАДАНИЕ ФУНКЦИЙ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ДИССИПАТИВНОЙ МАТРИЦЫ, ВХОДЯЩЕЙ В УРАВНЕНИЯ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	28
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	36
Галишников И. С., Аминев Д. А., Бунина А. В., Козырев Д. В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ	44
Коваль А. А., Капустин Д. А., Короп Г. В., Онопченко С. В., Сентяй Р. Н. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕНАЖЕРНОЙ СИСТЕМЫ НАЧАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	54
Китаев В. Н., Афанасьев Р. А., Петров М. В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО ЗАМЫКАТЕЛЯ	66

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Бояркин Д. С., Ежижанский В. Д., Голушко Д. А., Абузяров И. Р., Лысенко А. В. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕТОКА ГАЗА ЧЕРЕЗ КРАНОВЫЙ УЗЕЛ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ	72
Якимов А. Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ АНТЕНН	80

Мосеев А. П., Цыпин Б. В., Бростилов С. А., Горшков П. С., Кузин Н. А. РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ, В ТОМ ЧИСЛЕ С ДИНАМИЧЕСКИ ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫМИ ПРЕДЕЛАМИ ИЗМЕРЕНИЙ, НА ОСНОВЕ МАТРИЧНЫХ СТРУКТУР	86
Бояркин Д. С., Ежижанский В. Д., Голушко Д. А., Кирсанов А. Ю., Лысенко А. В. ОБНАРУЖЕНИЕ НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ УТЕЧКИ ГАЗА	95
Жабин В. С., Муртазов А. К. НАДЕЖНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОЛЕТЯЩИХ ОБЪЕКТОВ ПЗС-СИСТЕМОЙ В МЕТЕОРНОЙ АСТРОНОМИИ.....	103

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Барзов А. А., Григорьев А. С., Сеина Я. Д., Пузаков В. С., Касенов А. Ж., Сафронова Н. Н. МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ПУТЕМ МЕЗОДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ	109
Заяра А. В., Фандеев В. П. ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	117

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Маслобоев А. В., Цыгичко В. Н. АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ВЛИЯНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ГЕОПОЛИТИКУ И БЕЗОПАСНОСТЬ: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И УГРОЗЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ.....	126
ДАЙДЖЕСТ СТАТЕЙ ЗА 2024 г.....	136

RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

№ 1 (49) 2025

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Abramov O.V.

FUNCTIONAL-PARAMETRIC DIRECTION OF RELIABILITY THEORY
AND THE PROBLEM OF ENSURING TECHNOGENIC SAFETY 5

Mikheev M.Yu., Prokofiev O.V., Semochkina I.Yu.

THE ARTIFICIAL INTELLIGENCE RISKS WHEN USED IN SOCIOTECHNICAL SYSTEMS 12

Prokofiev O.V.

GENESIS OF RISKS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND THEIR IMPLEMENTATION
IN AUTONOMOUS SYSTEMS FOR RESPONSIBLE PURPOSE..... 20

Starostin I.E.

CORRECT ASSIGNMENT OF STATE FUNCTIONS FOR THE DISSIPATE
MATRIX INCLUDED IN THE EQUATIONS OF THE METHOD
OF MATHEMATICAL PROTOTYPING OF ENERGY PROCESSES 28

Starostin I.E., Gavrilencov S.I.

ASSIGNMENT OF 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 36

Galishnikov I.S., Aminev D.A., Bunina L.V., Kozyrev D.V.

DETERMINING THE RELIABILITY OF AN OBJECT RECOGNITION
SYSTEM USING HYBRID IDENTIFICATION 44

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

A CONCEPTUAL MODEL OF A SIMULATOR SYSTEM FOR THE INITIAL TRAINING
OF OPERATORS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES..... 54

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

MATHEMATICAL MODEL OF THE INERTIA CLOSER..... 66

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Boyarkin D.S., Yezhizhanskiy V.D., Golushko D.A., Abuzyarov I.R., Lysenko A.V.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE AMOUNT OF GAS FLOW
THROUGH THE VALVE ASSEMBLY OF PIPELINE FITTINGS..... 72

Yakimov A.N.

USING THE NUMERICAL METHOD TO CONTROL OF PARAMETERS
OF RADIATION PATTERNS AT AUTOMATED ANTENNA DESIGN 80

Moseev A.P., Tsypin B.V., Brostilov S.A., Gorshkov P.S., Kuzin N.A.

DEVELOPMENT OF MULTIFUNCTIONAL INTELLIGENT PRESSURE TRANSDUCERS,

INCLUDING THOSE WITH DYNAMICALLY SWITCHABLE MEASUREMENT LIMITS, BASED ON MATRIX STRUCTURES	86
Boyarkin D.S., Yezhizhanskiy V.D., Golushko D.A., Kirsanov A.Yu., Lysenko A.V. LEAK DETECTION OF SHUT-OFF VALVES OF MAIN GAS PIPELINES BY ANALYZING THE FREQUENCY SPECTRUM OF THE ACOUSTIC EMISSION SIGNAL ABOUT A GAS LEAK.....	95
Zhabin V.S., Murtazov A.K. RELIABILITY OF FAST-MOVING OBJECTS RECORDING BY CCD-SYSTEM IN METEOR ASTRONOMY	103

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Barzov A.A., Grigoriev A.S., Seina Ya.D., Puzakov V.S., Kasenov A.Zh., Safronova N.N. A MODEL FOR PREDICTING THE RESOURCE PARAMETERS OF PRODUCTS BY MESO-DIAGNOSING THEIR FUNCTIONAL DAMAGE DURING OPERATION	109
Zayara A.V., Fandeev V.P. APPLICATION OF THE KERNEL PROBABILITY DENSITY ESTIMATE TO SOLVE THE PROBLEM OF CLASSIFICATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF COMPLEX SYSTEMS	117

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Masloboev A.V., Tsygichko V.N. TREND ANALYSIS IN THE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IMPACT ON GEOPOLITICS AND SECURITY: NEW CHALLENGES AND THREATS OF DIGITAL TRANSFORMATION.....	126
DIGEST OF ARTICLES 2024	136

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 519.81: 629.039.58

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

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ И ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

О. В. Абрамов

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия
abramov@iacp.dvo.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрены некоторые подходы к решению проблемы обеспечения техногенной безопасности, базирующиеся на идеях функционально-параметрического направления теории надежности. *Материалы и методы.* Предложены формальные постановки некоторых модификаций задачи обеспечения безопасности и исследован один из возможных методов решения задачи снижения рисков возникновения чрезвычайных (аварийных) ситуаций. *Результаты и выводы.* Предлагаемые математические модели могут служить основой решения задач управления надежностью и безопасностью сложных систем ответственного назначения.

Ключевые слова: надежность, безопасность, параметр, математическая модель, прогноз, случайный процесс, мониторинг, техническое состояние

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FWW-2021-0003).

Для цитирования: Абрамов О. В. Функционально-параметрическое направление теории надежности и проблема обеспечения техногенной безопасности // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 5–11. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-1

FUNCTIONAL-PARAMETRIC DIRECTION OF RELIABILITY THEORY AND THE PROBLEM OF ENSURING TECHNOGENIC SAFETY

O.V. Abramov

Institute for Automation and Control processes, Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
abramov@iacp.dvo.ru

Abstract. *Background.* Some approaches to solving the problem of ensuring technogenic safety based on the ideas of the functional-parametric direction of reliability theory are considered. *Materials and methods.* Formal formulations of some modifications of the safety task are proposed and one of the possible methods for solving the problem

of reducing the risks of emergency situations is investigated. *Results and conclusions.* The proposed mathematical models can serve as the basis for solving problems of reliability and security management of complex responsible systems.

Keywords: reliability, safety, parameter, mathematical model, forecast, random process, monitoring, technical condition

Financing: the work was carried out within the framework of the state assignment of the IAP Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (topic no. FFW-2021-0003).

For citation: Abramov O.V. Functional-parametric direction of reliability theory and the problem of ensuring technogenic safety. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(1):5–11. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-1

Введение

Проблема обеспечения безопасности во многом связана с задачей предотвращения отказов технических устройств и систем, которые могут привести к возникновению чрезвычайных (аварийных) ситуаций [1–4]. По данным МЧС РФ, техногенные чрезвычайные ситуации (ЧС) составляют около 70 % от общего числа ЧС. Высокий уровень чрезвычайных ситуаций техногенного характера делает актуальным решение целого ряда новых задач обеспечения надежности и безопасности.

Говоря о техногенном факторе, прежде всего, имеют в виду неудовлетворительное техническое состояние исследуемого объекта, следствием которого становится потеря работоспособности (отказ) техники. Причинами отказа могут стать ошибки, допущенные на этапе проектирования, недостатки выбранной технологии производства и соответствующих средств реализации проектных решений, несовершенство процесса испытаний или ошибки, которые могут быть допущены на этом этапе производства, и, наконец, риск возникновения аварийных ситуаций во многом связан с недостатками процесса эксплуатации технических устройств и систем. Одним из перспективных путей решения проблемы обеспечения безопасности (снижения аварийности) может стать использование методов и средств функционально-параметрического направления теории надежности [5, 6].

Деградационные изменения параметров технических устройств и систем как причина нарушения условий безопасности

В соответствии с методологией функционально-параметрического направления теории надежности (ФП-подхода) процесс функционирования системы и ее техническое состояние в любой момент времени определяются конечным набором некоторых переменных – параметров системы, а все отказы (рисковые события) есть следствие эксплуатационных отклонений параметров от их некоторых исходных (номинальных, расчетных) значений [5]. Формой проявления отказа является нарушение условий работоспособности: выход параметров состояния технической системы за пределы области допустимых значений (области работоспособности).

Основу методологии ФП-подхода составляют методы управления случайными процессами изменения (деградации) параметров исследуемых технических объектов [6].

Отклонения параметров образуются под влиянием различных факторов, действующих в процессе производства, хранения и эксплуатации, и имеют случайный характер. Поэтому параметры технических устройств и систем следует рассматривать как некоторые случайные функции времени, закономерности которых (модели случайных процессов деградации параметров) в рамках ФП-подхода должны быть известными [7, 8].

Моделирование процессов изменения параметров технического состояния систем ответственного назначения

Моделирование процессов изменения параметров особенно важно для объектов ответственного назначения, потеря работоспособности которых связана с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями. В большинстве своем это сложные системы, изготавливаемые в небольшом числе экземпляров, эксплуатирующиеся в отличающихся условиях и реализующие экстремальные технологии. Стратегия эксплуатации таких систем должна носить индивидуальный и превентивный (упреждающий отказы) характер [9, 10]. Основные трудности при решении задачи синтеза стратегии их эксплуатации связаны с тем, что решение приходится осуществлять для каждого объекта индивидуально, при малых объемах исходной информации (по небольшому набору результатов

контроля) и в присутствии помех (ошибок контроля), статистические свойства которых достоверно не известны. В этих условиях целесообразно объединить всю доступную информацию как объективного (статистика, результаты измерений), так и субъективного (экспертного) происхождения, иначе говоря, воспользоваться экспертно-статистическим подходом.

В рамках экспертно-статистического подхода предполагается естественным воспользоваться той же схемой действий, которую обычно называют действиями по аналогии и базируются на тех «прецедентах», что составляют содержание накопленного опыта.

Суть подхода на основе метода аналогов заключается в том, чтобы объединить возможности современной информационной теории с аппаратом методов теории систем с искусственным интеллектом (которыми в данном случае являются различные компьютерные реализации схем действий по аналогии) [11–13]. Выбор данного подхода оправдан, если к моменту возникновения проблемы моделирования деградации технического состояния уже накоплен определенный опыт решения похожих проблем, возникающих ранее на подобных технических объектах (аналогах). Представление этого опыта в виде прецедентов и его автоматизированная обработка с помощью специализированных программных систем может позволить значительно повысить эффективность результатов.

Решение проблемы принятия решений по прецедентам основано на распознавании текущей проблемной ситуации, информация о которой представлена в виде некоторого образа (прецедента), и поиска похожих образов, содержащихся в хранилище образов (базе прецедентов) с последующей их адаптацией и использованием для решения задачи принятия решений.

Обеспечение техногенной безопасности объектов ответственного назначения

Решение задачи обеспечения безопасности систем ответственного назначения (СОН) в большей степени зависит от возможности мониторинга и прогнозирования их технического состояния или остаточного ресурса.

Под мониторингом понимается процесс получения и первичной обработки информации о техническом состоянии элементов СОН, воздействующих факторах окружающей среды и реализуемых СОН эксплуатационных процессах. Данные мониторинга являются важным элементом решения задачи оценки остаточного ресурса (запаса работоспособности), прогнозирования изменения технического состояния в процессе эксплуатации и снижения риска возникновения аварийных ситуаций (обеспечения требуемого уровня безопасности).

Проблема обеспечения техногенной безопасности (предупреждения отказов) СОН связана с решением следующих задач:

- оценка технического состояния системы в интересующий нас момент времени (заданный или рассчитываемый);
- оценка запаса работоспособности или остаточного ресурса в определенный момент времени;
- прогнозирование расходования ресурса (изменения технического состояния);
- выбор наиболее эффективной стратегии эксплуатации, гарантирующей сохранение работоспособности в течение заданного или рассчитываемого времени эксплуатации.

Важную роль при решении проблемы предотвращения отказов СОН и обеспечения безопасности играет прогнозирование расходования ресурса работоспособности в процессе эксплуатации.

Основные трудности при решении задачи прогнозирования для синтеза превентивной стратегии эксплуатации связаны с тем, что прогноз приходится осуществлять для каждого объекта индивидуально, при малых объемах исходной информации (по небольшому набору результатов контроля), и в присутствии помех (ошибок контроля), статистические свойства которых достоверно не известны. В этих условиях классические методы математической статистики и теории случайных процессов теряют свои привлекательные свойства, а их использование для прогнозирования приводит к существенным ошибкам и невысокой достоверности прогноза. В связи с этим необходимы расширение исходной информационной базы (за счет проведения комплексного обследования СОН и последующего мониторинга системы эксплуатации) и разработка новых методов прогнозирования, дополняющих уже известные.

В общем виде задача индивидуального прогнозирования технического состояния СОН сводится к оценке наблюдаемой в присутствии ошибок на интервале $T_p \subset T$, где T – интервал эксплуатации, реализации случайного процесса дрейфа выходных координат системы $y(t)$ при $t \in T \setminus T_p$. Рассмотрим постановку такой задачи.

Пусть изменения технического состояния системы на интервале эксплуатации могут быть описаны как

$$Y(t) = \mathbf{a}^T \mathbf{u}(t) + h(t), t \in T, \quad (1)$$

где $\mathbf{a} = \{a_j\}_{j=0}^n$ – вектор случайных коэффициентов; $\mathbf{u} = \{u_j(t)\}_{j=0}^n$ – непрерывные детерминированные функции времени; $h(t)$ – ошибка модели (1), о которой известно только, что она по модулю не превышает некоторой заданной величины (а в общем случае функции) $f(t)$:

$$|h(t)| \leq f(t). \quad (2)$$

Представление (1) можно рассматривать как некоторое разложение случайного процесса $Y(t)$ по координатному базису $\{u_j(t)\}_{j=0}^n$.

Реализация этого случайного процесса $y(t)$ наблюдается на интервале $T_p \subset T$ с аддитивной ошибкой $s(t)$. Наблюдения образуют последовательность $\mathbf{z} = \{z(t_k)\}_{k=1}^p$, $t_k \in T_p \subset T$. Вероятностные свойства $s(t)$ не определены, а известно только, что модуль ошибки не превышает $c(t)$.

Модель (1), ограничения на помехи (ошибки используемой модели и данные измерений $\mathbf{z}$, $t_k \in T_p \subset T$) составляют совокупность исходных сведений для решения задачи индивидуального прогнозирования. Ограниченность и неопределенность этих сведений, в частности, отсутствие достоверных сведений о вероятностных характеристиках возмущающих факторов, затрудняют получение оценок $y(t)$, $t \in T \setminus T_p$ с использованием известных статистических методов, таких как методы наименьших квадратов, наименьших модулей и др. Более пригодным здесь может быть построение искомых оценок из расчета на «наихудший» случай, т.е. на основе принципа минимакса.

Пусть в зависимости (1) модельные ошибки отсутствуют, т.е.

$$y(t) = \mathbf{a}^T \mathbf{u}(t), t \in T. \quad (3)$$

Предположим, что возможен непрерывный контроль $y(t)$, в результате которого получена реализация $z(t)$ на интервале $T_p \subset T$. Тогда с учетом возможной ошибки контроля можно записать

$$z(t) - c(t) \leq y(t) \leq z(t) + c(t), \quad t \in T_p \subset T. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что на интервале T_p истинная реализация $y(t)$ заключена в «трубке», ограниченной функциями $z(t) - c(t)$ и $z(t) + c(t)$. В этой трубке находится множество реализаций вида (3), которые назовем допустимыми. Для прогнозирования процесса $y(t)$ при $t \in T \setminus T_p$ выделим из этого множества «наихудшие», т.е. такие, которые при $t \in T \setminus T_p$ идут выше или ниже остальных.

Можно показать, что при наложении некоторых ограничений на функции $\mathbf{u} = \{u_j(t)\}_{j=0}^n$, в частности, если данные функции образуют на интервале T систему Чебышева, такими «наихудшими» реализациями будут экстремальные полиномы Карлина $y(t)^-$ и $y(t)^+$ [14, 15].

Функции $y(t)^-$ и $y(t)^+$ выделяют при $t \in T \setminus T_p$ так называемый «конус прогноза» в том смысле, что действительная реализация исследуемого процесса гарантированно находится внутри этого конуса при $t \in T \setminus T_p$.

Построим алгоритм нахождения экстремальных реализаций с учетом дискретности контроля. Можно показать, что в такой ситуации поиск $y(t)^-$ и $y(t)^+$ сводится к решению двух задач линейного программирования [14]:

$$\begin{aligned} 1) & \max \mathbf{a}^T \mathbf{u}(t^*), \\ 2) & \min \mathbf{a}^T \mathbf{u}(t^*), \quad t^* \in T \setminus T_p, \end{aligned}$$

при ограничениях

$$z(t_k) - c(t_k) \leq \mathbf{a}^T \mathbf{u}(t_k) \leq z(t_k) + c(t_k), \quad k = \overline{1, p}.$$

Рассматриваемый алгоритм прогнозирования отвечает общим требованиям, предъявляемым на практике к любой прогнозирующей процедуре. Он обладает свойством оптимальности (в минимаксном смысле), однозначности и несмещенности. Кроме ошибок измерений, в данном алгоритме можно учитывать и другие погрешности, в том числе и ошибки модели эксплуатационных изменений параметров технического состояния СОН (1). Их учет не оказывает принципиального влияния на процедуру построения «конуса прогноза». Если же базовая модель $y(t)$ содержит структурные ошибки, то для повышения точности прогноза можно использовать специальный алгоритм с адаптацией. Основная идея такого алгоритма аналогична принципам, заложенным в методах скользящего среднего или экспоненциального сглаживания и состоящим в задании различных весов результатам измерений.

Остановимся на использовании рассматриваемого алгоритма прогноза для решения задач оценки момента наступления отказа (рискового события) и принятия управленческих решений (назначения моментов контроля, прекращения эксплуатации и проведения профилактических коррекций параметров).

Пусть работоспособность объекта определяется состоянием контролируемого дискретно выходного параметра $y(t)$. В достаточно общей форме условие работоспособности может быть задано в виде

$$A(t) \leq y(t) \leq B(t),$$

где $A(t)$, $B(t)$ – нижняя и верхняя границы допустимых изменений параметров соответственно. Задача состоит в назначении таких моментов контроля и коррекций параметра (прекращения эксплуатации), при которых гарантируется его нахождение в области допустимых значений (выполнение условий работоспособности) в течение времени эксплуатации $[0, T]$. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы число контрольных замеров (и коррекций) было по возможности минимальным.

Пусть по результатам p контрольных измерений построены экстремальные реализации при $t > t_p$. Пересечение экстремальных реализаций с границами области допустимых изменений параметра $A(t)$ и $B(t)$ определит моменты времени τ_A и τ_B , минимальный из которых целесообразно принять за возможный момент наступления рискованного события:

$$t_{p+1} = \min\{\tau_A, \tau_B\}.$$

Моменты времени τ_A , τ_B находятся решением уравнений:

$$y(t)_- = A(t) \text{ и } y(t)_+ = B(t).$$

Очевидно, что в течение времени $t_r = t_{p+1} - t_p$ контролируемый параметр будет гарантированно находиться в области допустимых значений, поэтому до момента t_{p+1} производить измерение или коррекцию параметра нет необходимости. В момент t_{p+1} следует провести очередное измерение параметра, результат которого (z_{p+1}, t_{p+1}) можно использовать для расчета параметров новых экстремальных реализаций. Определяется очередной промежуток времени, в течение которого параметр не выйдет за допустимые пределы. Если этот промежуток (назовем его интервалом гарантированной безопасной эксплуатации) окажется меньше некоторого наперед заданного минимально целесообразного времени эксплуатации $t_r^{\min}(t_{p+z} - t_{p+1} < t_r^{\min})$, то в момент времени t_{p+1} следует прекратить эксплуатацию (произвести профилактическую коррекцию параметра).

Таким образом, рассматриваемый метод (гарантированного прогноза) позволяет определить некоторую область, в пределах которой гарантированно будут находиться параметры технического состояния СОН в заданный момент времени. Как отмечалось выше, он обладает необходимыми свойствами несмещенности, однозначности и оптимальности. Результаты прогноза позволяют оценить момент наступления рискованного события и остаточный ресурс СОН, а также определить стратегию обеспечения безопасности (назначать целесообразные моменты контроля состояния, прекращения эксплуатации, а также проведения профилактических и ремонтных работ).

Желательно, чтобы стратегия обеспечения техногенной безопасности была такой, при которой суммарные потери, связанные с эксплуатацией исследуемой СОН, были бы минимальными. В ряде случаев в качестве критерия выбора этой стратегии можно использовать показатель гарантированного уровня общих материальных потерь при эксплуатации системы на множестве T :

$$S_g = \sup_{y(t) \in Y \cdot T} \int_T H(y(t)) dt + V_T,$$

где $H(y(t))$ – функция потерь, определяющих материальные потери, возникающие при отклонении вектора технического состояния объекта $y(t)$ от номинального; V_T – затраты на проведение мероприятий по техническому обслуживанию объекта во время эксплуатации.

Аддитивность критерия S_g открывает путь к решению задачи на основе принципа оптимальности Беллмана [16]. При этом поиск искомой стратегии можно рассматривать как многошаговый управляемый процесс принятия решений для синтеза оптимальной системы управления, а S_g – финальная функция потерь (сумма потерь, связанных со всеми шагами принятия решений). Соответствующие алгоритмы являются адаптивными, так как совместно с принятием основных решений оценивают неизвестную обстановку, чем улучшают процесс принятия решений, достаточно просты и могут быть реализованы в рекуррентном виде.

Заключение

Исследуются некоторые подходы к решению задачи предотвращения аварий и обеспечения техногенной безопасности. Даны формальные постановки задач управления безопасностью, для решения которых целесообразно использовать методологию функционально-параметрического направления теории надежности. Показано, что основные идеи функционально-параметрического направления теории надежности могут быть использованы и при решении достаточно широкого круга задач, теории безопасности. Предложены некоторые подходы к решению задачи предотвращения аварий на технических объектах ответственного назначения. Показано, что реализация возможностей функционально-параметрического подхода теории надежности при решении задач обеспечения безопасности объектов ответственного назначения связана с внедрением методов и средств технического контроля состояния и диагностирования в практику их эксплуатации.

Список литературы

1. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023.
2. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Новосибирск : Наука, 2005.
3. Абрамов О. В. К проблеме предотвращения аварий технических объектов ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 1. С. 11–16.
4. Северцев Н. А., Бецков А. В. Системный анализ безопасности. М. : МГУ «ТЕИС», 2009.
5. Abramov O., Dimitrov B. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach // Reliability: Theory & Applications. 2017. Vol. 12, № 4. P. 39–48.
6. Абрамов О. В. Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. 2014. № 4. С. 53–66.
7. Абрамов О. В. Дестабилизирующие факторы и случайные процессы изменения параметров технических устройств и систем // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 13–20.
8. Берман А. Ф. Дegradaция механических систем. Новосибирск : Наука, 1998.
9. Абрамов О. В. Прогнозирование состояния и планирование эксплуатации систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 5–14.
10. Abramov O. Failure prevention based on parameters estimation and prediction // Reliability: Theory & Applications. 2006. Vol. 1, № 2. P. 57–62.
11. Aamodt A., Plaza E. Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations and system approaches // AI Communications. 1994. Vol. 7, № 1. P. 39–59.
12. Абрамов О. В., Назаров Д. А. Методы и средства интеллектуальной поддержки прогноза технического состояния систем ответственного назначения // Информатика и системы управления. 2022. № 4. С. 54–63.
13. Abramov O., Nazarov D. Methods and tools of intelligent support for forecasting the technical condition of critical systems // Reliability: Theory & Applications. 2024. Vol. 19, № 4. P. 924–930.
14. Абрамов О. В. Основные особенности и свойства метода гарантированного прогноза // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 1. С. 3–10.
15. Карлин С., Стадден В. Чебышевские системы и их применение в анализе и статистике : пер. с англ. М. : Наука, 1976.
16. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М. : Наука, 1965.

References

1. 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. (In Russ.)

2. Makhutov N.A. *Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost' = Structural strength, resource and technogenic safety*. Novosibirsk: Nauka, 2005. (In Russ.)
3. Abramov O.V. On the problem of accident prevention of technical facilities of responsible purpose. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(1):11–16. (In Russ.)
4. Severtsev N.A., Betskov A.V. *Sistemnyy analiz bezopasnosti = System analysis of safety*. Moscow: MGU «TEIS», 2009. (In Russ.)
5. Abramov O., Dimitrov B. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach. *Reliability: Theory & Applications*. 2017;12(4):39–48.
6. Abramov O.V. Possibilities and prospects of the functional-parametric direction of reliability theory. *Informatika i sistemy upravleniya = Informatics and Control systems*. 2014;(4):53–66. (In Russ.)
7. Abramov O.V. Destabilizing factors and random processes of changing the parameters of technical devices and systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):13–20. (In Russ.)
8. Berman A.F. *Degradatsiya mekhanicheskikh system = Degradation of mechanical systems*. Novosibirsk: Nauka, 1998. (In Russ.)
9. Abramov O.V. Forecasting the condition and operation planning of responsible systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):5–14. (In Russ.)
10. Abramov O. Failure prevention based on parameters estimation and prediction. *Reliability: Theory & Applications*. 2006;1(2):57–62.
11. Aamodt A., Plaza E. Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations and system approaches. *AI Communications*. 1994;7(1):39–59.
12. Abramov O.V., Nazarov D.A. Methods and means of intellectual support for forecasting the technical condition of responsible systems. *Informatika i sistemy upravleniya = Informatics and management systems*. 2022;(4):54–63. (In Russ.)
13. Abramov O., Nazarov D. Methods and tools of intelligent support for forecasting the technical condition of critical systems. *Reliability: Theory & Applications*. 2024;19(4):924–930.
14. Abramov O.V. Main features and properties of the guaranteed method forecasting. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(1):3–10. (In Russ.)
15. Karlin S., Stadden V. *Chebyshevskie sistemy i ikh primenenie v analize i statistike: per. s angl. = Chebyshev systems and their application in analysis and statistics : translated from English*. Moscow: Nauka, 1976. (In Russ.)
16. Bellman R., Dreyfus S. *Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya = Applied problems of dynamic programming*. Moscow: Nauka, 1965. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Васильевич Абрамов

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
главный научный сотрудник лаборатории
управления надежностью сложных систем,
Институт автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения
Российской академии наук
(Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5)
E-mail: abramov@iacp.dvo.ru

Oleg. V. Abramov

Doctor of technical sciences, professor,
honored scientist of the Russian Federation,
chief researcher of the laboratory
of complex systems reliability management,
Institute for Automation and Control processes,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
(5 Radio street, Vladivostok, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 13.02.2025

Принята к публикации / Accepted 25.02.2025

РИСКИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

М. Ю. Михеев¹, О. В. Прокофьев², И. Ю. Семочкина³

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Применение автономных устройств с искусственным интеллектом в социотехнических системах привело к появлению новых задач, решение которых значительно сложнее по сравнению с задачами предыдущего этапа совершенствования человекомашинного интерфейса. Авторами работы было проведено исследование по выявлению источников риска в социотехнических системах и способов их снижения на этапах жизненного цикла автономных устройств. *Материалы и методы.* В исследовании использованы данные открытых отчетов к статистическим опросам разработчиков и пользователей устройств ответственного назначения, отчетов об исследовании аварий автономного транспорта Uber AV. *Результаты.* Даны формулировки источников риска, возникающих при использовании автономных устройств с искусственным интеллектом в социотехнических системах. Представлен пример жизненного цикла устройства, предусматривающий контроль человека на этапах разработки и эксплуатации. *Выводы.* Управление рисками в случаях ответственного применения устройства возможно при соответствии реальных этапов жизненного цикла перечисленному в статье ряду критериев безопасности.

Ключевые слова: риски искусственного интеллекта, социотехнические системы, автономные устройства, устройство ответственного назначения

Для цитирования: Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Риски искусственного интеллекта при использовании в социотехнических системах // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 12–19. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-2

THE ARTIFICIAL INTELLIGENCE RISKS WHEN USED IN SOCIOTECHNICAL SYSTEMS

M.Yu. Mikhееv¹, O.V. Prokofiev², I.Yu. Semochkina³

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

Abstract. *Background.* The use of autonomous devices with artificial intelligence in socio-technical systems has led to the emergence of new problems, the solution of which is much more complex compared to the tasks of the previous stage of improving the human-machine interface. The authors of the work conducted a study to identify risk sources in socio-technical systems and ways to reduce them at the stages of the life cycle of autonomous devices. *Materials and methods.* The study used data from open reports on statistical surveys of developers and users of critical devices, reports on the study of accidents of autonomous transport Uber AV. *Results.* The formulations of risk sources arising from the use of autonomous devices with artificial intelligence in socio-technical systems are given. An example of the life cycle of a device is presented, providing for human control at the stages of development and operation. *Conclusions.* Risk management in cases of critical use of a device is possible if the actual stages of the life cycle correspond to a number of safety criteria listed in the article.

Keywords: artificial intelligence risks, socio-technical systems, autonomous devices, critical device

For citation: Mikhееv M.Yu., Prokofiev O.V., Semochkina I.Yu. The artificial intelligence risks when used in sociotechnical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(1):12–19. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-2

Введение

Социотехнические системы (СТС), включающие людей, технологии, способы взаимодействия и зависимости между ними, предназначены для достижения наибольших результатов конечным

пользователям, повышения эффективности управления производством и решения социальных проблем [1]. В предыдущие 60 лет развитие концепции этих систем было сконцентрировано в относительно узкой области человекомашинных систем на производстве, и мотивацией развития являлось решение проблем рабочей среды в индустрии, в том числе реализации новых технологий, промышленного дизайна и эргономики. Затем расширение сферы применения социотехнических систем было связано не только с более высокими требованиями к программно-аппаратному обеспечению, но и с появлением личных и общественных аспектов для конечных пользователей. Социальные сети, мессенджеры и блоггерство привели к необходимости оценки качества информации, соблюдения правил цифровой гигиены при взаимодействии людей и технологий. Сегодняшняя реальность, связанная с появлением автономных устройств с искусственным интеллектом (ИИ) как части социотехнической системы, дала новый источник рисков, трудно поддающихся оценке, моделированию и прогнозированию.

Быстрое развитие и внедрение ИИ в области применения от здравоохранения до обороны, от финансов до автономного транспорта не может не затронуть общественную жизнь и права отдельных людей. Существует обоснованное мнение, отличающееся от мнения разработчиков ИИ о том, что принятие решений автономными устройствами основано на принципах беспристрастности, объективности и свободно от человеческих предубеждений. Необходимость обеспечения ускоренного развития искусственного интеллекта, с одной стороны, а также опасения в отношении трудовой занятости, возможность злоупотребления общественным контролем, ненулевая вероятность принятия недостаточно обоснованных решений в отношении здоровья и жизни людей, с другой стороны, привели к появлению законодательных актов, деклараций, открытых писем, руководств по этическим принципам ИИ [2–16].

Указом Президента № 124 от 15.02.2024 были внесены изменения в Национальную стратегию развития ИИ до 2030 г. Обновлены основные принципы развития и использования технологий ИИ, которые должны обязательно соблюдаться, в т.ч. заявлена прозрачность и объяснимость работы ИИ, недискриминационный доступ пользователей к информации об алгоритмах [17].

Сдержанные оценки в отношении безопасности технологий ИИ высказываются экспертами, обладающими опытом разработки автономных устройств в сферах транспорта, медицины и других чувствительных для человека и общества областях [18, 19]. Поэтому целью работы авторами выбрана разработка методологии снижения рисков искусственного интеллекта для безопасного внедрения автономных устройств в социотехнические системы [20].

Материалы и методы

В исследовании использованы результаты опроса экспертов в области ИИ, проводимые корпорациями-разработчиками систем ответственного назначения с ИИ. На рис. 1 изображен пример результатов опросов корпорацией RAND 2500 респондентов, имеющих отношение к области разработок ИИ и к смежным областям [21]. В продолжение темы, затронутой в предыдущей диаграмме, приведен рис. 2, затрагивающий потенциальную возможность провоцирующего поведения автономного оружия.

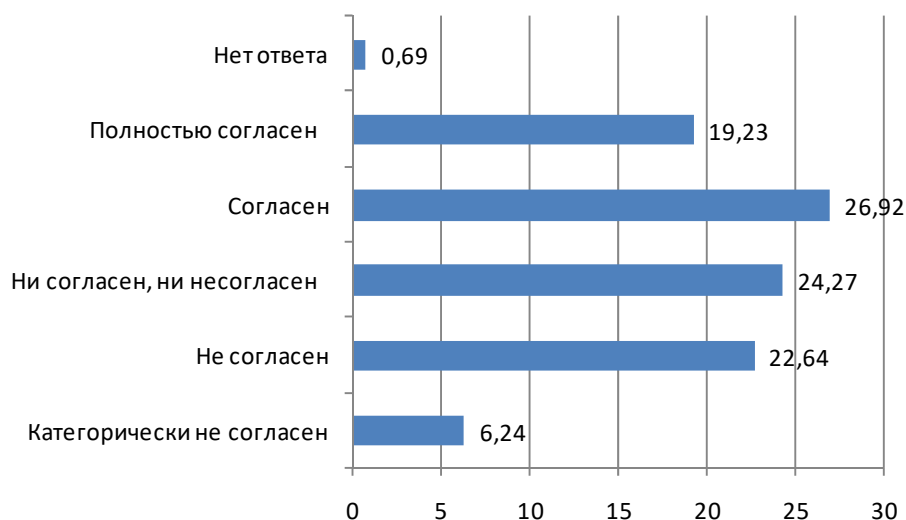


Рис. 1. Оценка высказывания «Автономное оружие должно быть запрещено с этической точки зрения, поскольку оно снижает ценность человеческой жизни (% опрошенных)»

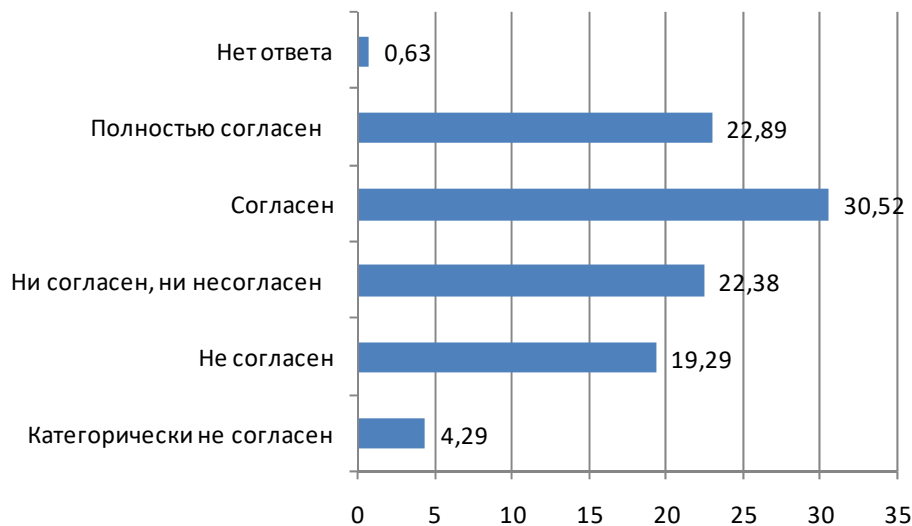


Рис. 2. Оценка высказывания «Развитие автономного оружия повысит вероятность возникновения войны (% опрошенных)»

Ниже представлены примеры результатов опроса экспертов Рабочей группы по рискам и безопасности в области ИИ и машинного обучения (МО) [22]: заданные вопросы и распределение ответов.

- Есть ли у вашего предприятия согласованное определение ИИ /МО? 40 % ответили «да».
- Обновило ли ваше предприятие существующие политики и стандарты для ИИ / МО? 50 % ответили «да».
- Определены ли на вашем предприятии роли и ответственность за системы ИИ / МО? 30 % ответили «да».

Как видно из этих результатов, в настоящее время адекватное понимание проблемы снижения рисков возникновения массовых вооруженных конфликтов полностью не достигается даже в наиболее передовых экономиках. Поэтому задачами исследования становится выявление мер противодействия рискам и способов их применения в социотехнических системах.

Результаты

Анализ открытых отчетов [19, 20] позволяет охарактеризовать пять фундаментальных источников социотехнического риска в автономных устройствах с ИИ, каждый из которых характеризуется рядом конкретных моделей социотехнических отказов и ошибок. В совокупности области структурного, организационного, технологического, эпистемологического и культурного рисков образуют структуру социотехнического риска в системах искусственного интеллекта (*Artificial Intelligence System*) (рис. 3).



Рис. 3. Социотехнические источники риска

Источники структурного риска возникают из-за взаимозависимостей и взаимодействия между различными частями технических и социальных структур. Структура СТС определяет, как различные части системы взаимодействуют друг с другом, и формирует то, как развиваются сбои. Структурные механизмы могут выступать в качестве источников риска, усиливая или передавая локальные сбои способами, которые выводят из строя всю систему. Например, аварии автономного транспорта Uber AV возникали из-за структурно взаимосвязанных сбоев, которые взаимодействовали между различными частями и в разных масштабах системы, охватывали конструкцию системы автономного вождения, деятельность операторов транспортных средств, решения инженеров и менеджеров, процессы тестирования транспортных средств и действия других участников дорожного движения и регулирующих органов. Структурные характеристики этой СТС позволяли сбоям в одной области быстро разрастаться или влиять на другие части системы (зачастую непредсказуемым образом).

Организационная деятельность может выступать источником риска в системах искусственного интеллекта, особенно когда организационный контекст нечувствителен к характеристикам деятельности человека, а организационные процессы неэффективны при обнаружении и управлении ошибками и сбоями. Авариям с Uber AV способствовала совокупность организационных, контекстуальных и человеческих факторов, в том числе недостатки в системах контроля, пробелы в знаниях в области безопасности, плохое взаимодействие человека и машины.

Разработка и эксплуатация автономных устройств с ИИ зависят от накопления и поддержания знаний о том, как оно работает, а также о том, как и почему оно может выйти из строя. Эпистемологические проблемы могут выступать в качестве источников риска, когда эти знания являются частичными, неверными или устаревшими, позволяя под недостаточной информированностью скрывать неожиданные угрозы. Аварии с Uber сформировали различные эпистемологические процессы, в которых участвовал экспериментальный автомобиль, который использовался для тестирования и исследования производительности системы. При этом допускались задержки в рассмотрении неожиданных инцидентов, были пробелы в изучении дорожных ситуаций. Эпистемологические проблемы усугубляются сложными, инновационными технологиями, которые создают возможности для неожиданных эффектов.

Социокультурные особенности могут выступать в качестве источников риска, поддерживая поведение и убеждения, которые приближают автономное устройство к пределам безопасной эксплуатации и приводят к тому, что предупреждающие сигналы неправильно интерпретируются, сводятся к минимуму, пропускаются или игнорируются. Сообщается, что с аварией Uber был связан целый ряд культурных факторов, в том числе акцент на показателях производительности, давление управляющего персонала, игнорирование мнения оперативного персонала и ошибочные предположения относительно эффективности человеческой бдительности и рисков испытания на дороге. Такие риски существуют в СТС как коллективные практики, нормы, ценности и предположения, которые глубоко формируют организационное поведение, расставляют приоритеты внимания. Коллективные ценности и убеждения могут сосредоточить внимание организации на конкретных данных и показателях, одновременно игнорируя другие.

Технологические свойства ИИ могут выступать в качестве источников риска, когда они приводят к тому, что автономное устройство может не работать должным образом, ведет себя неожиданным образом или его становится трудно контролировать. Как в случае с авариями Uber AV, которые стали результатом сложной системы технических сбоев и ограничений, включая проблемы со способностью автомобиля воспринимать объекты и прогнозировать путь пешеходов, правила подавления действий, которые задерживали реакцию автомобиля на предполагаемые опасности, а также ограничения на функции экстренного торможения. Технологические недостатки могут возникнуть во время проектирования и разработки: ошибки кодирования или ошибочные предположения могут быть заложены в технические объекты, снижая технологически обусловленную надежность. Конструктивные особенности могут усложнить или исключить эффективное взаимодействие человека и машины. Сбои могут возникнуть в мониторинге и контроле технологий: технологические стандарты могут быть плохо определены или неправильно применяться. Таким образом, источники технологических рисков проявляются на фазах жизненного цикла устройства с ИИ, эти риски в наибольшей степени доступны управлению за счет инженерных решений.

Обсуждение

На рис. 4 представлен пример жизненного цикла по версии, представленной *RAND Corporation* [21] для автономного вооружения с ИИ, в основу которого положено снижение рисков в столь чувствительной области применения. Как видно из рис. 4, этот подход направлен на то, что снижение рисков под контролем человека начинается еще до того, как система будет разработана посредством

правовой регламентации, и распространяется на весь жизненный цикл, вплоть до анализа боевых повреждений и других событий после внедрения.



Рис. 4. Жизненный цикл автономного вооружения с поэтапным контролем

Этот подход показывает, что участие человека реализуется в разных ролях в разное время. Необходимо рассмотреть различные точки соприкосновения со специалистами на протяжении жизненного цикла устройства, в том числе в рамках проектирования и разработки, создания правил взаимодействия и формирования процесса определения целей. Показанная формальная модель жизненного цикла позволяет, несмотря на упрощение реальных процессов, сделать ряд рекомендательных выводов.

Заключение

На основании примера можно сформулировать несколько ключевых критериев, имеющих отношение к обеспечению участия человека в ответственном применении ИИ для снижения рисков. Эти критерии не являются всеобъемлющими, но они указывают тип сопутствующих проблем проектирования устройства, которые необходимо решить.

Надежность и предсказуемость. Необходимо установить стандарты надежности и предсказуемости, чтобы гарантировать, что система будет работать в соответствии с назначением проекта. Такие стандарты должны быть установлены на этапе проектирования и разработки при производстве автономных устройств и они должны соответствовать требованиям, прежде чем они будут объявлены функциональными. После того, как устройства введены в эксплуатацию, необходимо постоянно собирать данные и периодически проводить оценки, чтобы убедиться, что они продолжают соответствовать стандартам.

Варианты вмешательства. Учитывая риски, связанные с авариями, непредвиденными последствиями или другими проблемами, важным критерием проектирования системы является возможность вмешательства для перенаправления или остановки системы. Насколько это возможно с параметрами требований миссии, человек-оператор должен иметь возможность своевременно вмешиваться в действия системы, чтобы перенаправить ее по мере необходимости. Насколько своевременными должны быть такие варианты вмешательства, будет зависеть от контекста. Операторы должны иметь возможность максимально оперативно вмешиваться в действия систем, критически важных для жизни и здоровья людей.

Доступность информации. Критерий касается требуемой степени прозрачности решений ИИ. Чтобы снизить риски ИИ, оператор должен знать, для чего предназначена система в конкретном рабочем контексте, и должен быть в состоянии определить в приемлемые сроки, как система пришла к критически важным решениям или почему она предприняла определенные действия. Передовая практика взаимодействия между людьми и машинами должна заключаться в том, чтобы оперативная ситуация была легко понятной для обученных операторов, обеспечивалась прослеживаемая обратная связь о состоянии системы; а также возможность предоставить обученным операторам четкие процедуры для активации и деактивации системных функций.

Ограничения на типы задач. Хотя большинство современных автономных устройств, как правило, имеют лишь узкий диапазон функциональных возможностей, будущие технологические разработки могут создать системы, способные выполнять широкий круг задач. Это условие будет ограничивать количество и типы задач, которые может выполнять система. Системы, которые совершают ответственные действия и образуют сопутствующие риски, могут включать дополнительные средства контроля.

Ограничения по географии. Некоторые автономные устройства имеют широкие навигационные возможности для перемещения в пространстве. Чтобы снизить риск, связанный с неограниченным движением, операторы должны иметь возможность устанавливать параметры, в пределах которых должно оставаться устройство. Если события или сбои приводят к тому, что система выходит за свои географические ограничения, оно может быть запрограммировано на прекращение задания и возвращение на исходную позицию.

Руководствуясь перечисленными критериями, разработка автономных устройств с ИИ позволит в полной мере реализовать их потенциальные возможности для многочисленных пользователей СТС при поддержании уровня рисков на приемлемо низком уровне [20, 23].

Список литературы

1. Sociotechnical system. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Sociotechnical_system
2. Pause Giant AI Experiments: An Open Letter. URL: <https://futureoflife.org/open-letter/pause-giant-ai-experiments/>
3. Boulanin V., Saalman L., Topychkanov P. [et al.]. Artificial Intelligence, Strategic Stability and Nuclear Risk. 2020. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-06/artificial_intelligence_strategic_stability_and_nuclear_risk.pdf
4. Integrating Cybersecurity and Critical Infrastructure. National, Regional and International Approaches / ed. by L. Saalman. 2018. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
5. The Impact of Artificial Intelligence on Strategic Stability and Nuclear Risk. Volume I. Euro-Atlantic Perspectives / ed. by V. Boulanin. 2020. URL: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/artificial-intelligence-strategic-stability-and-nuclear-risk>
6. Boulanin V., Verbruggen M. Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems. 2020. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
7. Boulanin V., Bruun L., Goussac N. Autonomous Weapon Systems And International Humanitarian Law. Identifying Limits and the Required Type and Degree of Human–Machine Interaction. 2021. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2021-06/2106_aws_and_ihl_0.pdf
8. Saalman L., Su F., Saveleva Dovgal L. Cyber Posture Trends in China, Russia, the United States and the European Union. 2022. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-12/2212_cyber_postures_0.pdf
9. Boulanin V. Mapping the development of autonomy in weapon systems. A primer on autonomy. 2017. URL: <https://www.sipri.org/sites/default/files/Mapping-development-autonomy-in-weapon-systems.pdf>
10. Boulanin V., Goussac N., Bruun L., Richards L. Responsible Military Use of Artificial Intelligence. Can the European Union Lead the Way in Developing Best Practice? 2020. URL: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/responsible-military-use-artificial-intelligence-can-european-union-lead-way-developing-best>
11. Boulanin V., Brockmann K., Richards L. Responsible Artificial Intelligence Research And Innovation For International Peace And Security. 2020. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-11/sipri_report_responsible_artificial_intelligence_research_and_innovation_for_international_peace_and_security_2011.pdf
12. Bromley M., Maletta G. The Challenge of Software and Technology Transfers to Non-Proliferation Efforts. Implementing and Complying with Export Controls. 2018. URL: <https://www.sipri.org/publications/2018/other-publications/challenge-software-and-technology-transfers-non-proliferation-efforts-implementing-and-complying>
13. Su F., Boulanin V., Turell J. Cyber-incident Management Identifying and Dealing with the Risk of Escalation. 2020. IPRI Policy Paper No. 55. URL: <https://www.sipri.org/publications/2020/sipri-policy-papers/cyber-incident-management-identifying-and-dealing-risk-escalation>
14. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102608394>
15. Альянс в сфере искусственного интеллекта. URL: <https://a-ai.ru/>
16. Кодекс этики в сфере искусственного интеллекта. URL: https://ethics.a-ai.ru/assets/ethics_files/2023/05/12/%D0%9A%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%8D%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8_20_10_1.pdf
17. Применение искусственного интеллекта на финансовом рынке : докл. для общественных консультаций. М. : Банк России, 2023. 51 с. URL: https://www.cbr.ru/Content/Document/File/156061/Consultation_Paper_03112023.pdf
18. Hindriks F., Veluwenkamp H. The risks of autonomous machines: from responsibility gaps to control gaps // Synthese. 2023. Vol. 201. doi: 10.1007/s11229-022-04001-5
19. Radanliev P., De Roure D., Maple C. [et al.]. Super forecasting the technological singularity risks from artificial intelligence // Evolving Systems. 2022. Vol. 13. P. 747–757. doi: 10.1007/s12530-022-09431-7
20. Macrae C. Learning from the Failure of Autonomous and Intelligent Systems: Accidents, Safety and Sociotechnical Sources of Risk // SSRN Electronic Journal. 2021. doi: 10.2139/ssrn.3832621

21. Morgan F. E., Boudreaux B., Lohn A. J. [et al.]. Military Applications of Artificial Intelligence Ethical Concerns in an Uncertain World. RAND Corporation, 2020. 202 p. URL: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR3139-1.html
22. Artificial Intelligence Risk & Governance. By Artificial Intelligence/Machine Learning Risk & Security Working Group (AIRS). The Wharton School, The University of Pennsylvania, 2024. URL: <https://ai.wharton.upenn.edu/white-paper/artificial-intelligence-risk-governance/>
23. Ruhl Ch. Autonomous weapon systems and military artificial intelligence (AI) applications report. 2022. URL: <https://wwwFOUNDERSpledge.com/research/autonomous-weapon-systems-and-military-artificial-intelligence-ai>
24. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Савочкин А. Е., Семочкина И. Ю. Обеспечение надежности в жизненном цикле систем искусственного интеллекта ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 12–20.
25. Иванов А. И., Иванов А. П., Савинов К. Н., Еременко Р. В. Виртуальное усиление эффекта распараллеливания вычислений при переходе от бинарных нейронов к использованию q-арных искусственных нейронов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 89–97.

References

1. *Sociotechnical system*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Sociotechnical_system
2. *Pause Giant AI Experiments: An Open Letter*. Available at: <https://futureoflife.org/open-letter/pause-giant-ai-experiments/>
3. Boulanin V., Saalman L., Topychkanov P. et al. *Artificial Intelligence, Strategic Stability and Nuclear Risk*. 2020. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-06/artificial_intelligence_strategic_stability_and_nuclear_risk.pdf
4. Saalman L. (ed.). *Integrating Cybersecurity and Critical Infrastructure. National, Regional and International Approaches*. 2018. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
5. Boulanin V. (ed.). *The Impact of Artificial Intelligence on Strategic Stability and Nuclear Risk. Volume I. Euro-Atlantic Perspectives*. 2020. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/artificial-intelligence-strategic-stability-and-nuclear-risk>
6. Boulanin V., Verbruggen M. *Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems*. 2020. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
7. Boulanin V., Bruun L., Goussac N. *Autonomous Weapon Systems And International Humanitarian Law. Identifying Limits and the Required Type and Degree of Human–Machine Interaction*. 2021. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2021-06/2106_aws_and_ihl_0.pdf
8. Saalman L., Su F., Saveleva Dovgal L. *Cyber Posture Trends in China, Russia, the United States and the European Union*. 2022. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-12/2212_cyber_postures_0.pdf
9. Boulanin V. *Mapping the development of autonomy in weapon systems. A primer on autonomy*. 2017. Available at: <https://www.sipri.org/sites/default/files/Mapping-development-autonomy-in-weapon-systems.pdf>
10. Boulanin V., Goussac N., Bruun L., Richards L. *Responsible Military Use of Artificial Intelligence. Can the European Union Lead the Way in Developing Best Practice?* 2020. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/responsible-military-use-artificial-intelligence-can-european-union-lead-way-developing-best>
11. Boulanin V., Brockmann K., Richards L. *Responsible Artificial Intelligence Research and Innovation for International Peace and Security*. 2020. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-11/sipri_report_responsible_artificial_intelligence_research_and_innovation_for_international_peace_and_security_2011.pdf
12. Bromley M., Maletta G. *The Challenge of Software and Technology Transfers to Non-Proliferation Efforts. Implementing and Complying with Export Controls*. 2018. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2018/other-publications/challenge-software-and-technology-transfers-non-proliferation-efforts-implementing-and-complying>
13. Su F., Boulanin V., Turell J. *Cyber-incident Management Identifying and Dealing with the Risk of Escalation*. 2020. IPRI Policy Paper No. 55. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2020/sipri-policy-papers/cyber-incident-management-identifying-and-dealing-risk-escalation>
14. *Natsional'naya strategiya razvitiya iskusstvennogo intellekta na period do 2030 goda = National Strategy for the development of artificial intelligence for the period up to 2030*. (In Russ.). Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102608394>
15. *Al'yans v sfere iskusstvennogo intellekta = Alliance in the field of artificial intelligence*. (In Russ.). Available at: <https://a-ai.ru/>
16. *Kodeks etiki v sfere iskusstvennogo intellekta = Code of Ethics in the field of artificial intelligence*. (In Russ.). Available at: https://ethics.a-ai.ru/assets/ethics_files/2023/05/12/%D0%9A%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%8D%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8_20_10_1.pdf
17. *Primenenie iskusstvennogo intellekta na finansovom rynke: dokl. dlya obshchestvennykh konsul'tatsiy = Application of artificial intelligence in the financial market : a report for public consultations*. Moscow: Bank Rossii, 2023:51. (In Russ.). Available at: https://www.cbr.ru/Content/Document/File/156061/Consultation_Paper_03112023.pdf

18. Hindriks F., Veluwenkamp H. The risks of autonomous machines: from responsibility gaps to control gaps. *Synthese*. 2023;201. doi: 10.1007/s11229-022-04001-5
19. Radanliev P., De Roure D., Maple C. et al. Super forecasting the technological singularity risks from artificial intelligence. *Evolving Systems*. 2022;13:747–757. doi: 10.1007/s12530-022-09431-7
20. Macrae C. Learning from the Failure of Autonomous and Intelligent Systems: Accidents, Safety and Sociotechnical Sources of Risk. *SSRN Electronic Journal*. 2021. doi: 10.2139/ssrn.3832621
21. Morgan F.E., Boudreaux B., Lohn A.J. et al. *Military Applications of Artificial Intelligence Ethical Concerns in an Uncertain World*. RAND Corporation, 2020:202. Available at: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR3139-1.html
22. *Artificial Intelligence Risk & Governance*. By Artificial Intelligence/Machine Learning Risk & Security Working Group (AIRS). The Wharton School, The University of Pennsylvania, 2024. Available at: <https://ai.wharton.upenn.edu/white-paper/artificial-intelligence-risk-governance/>
23. Ruhl Ch. *Autonomous weapon systems and military artificial intelligence (AI) applications report*. 2022. Available at: <https://www.founderspledge.com/research/autonomous-weapon-systems-and-military-artificial-intelligence-ai>
24. Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Savochkin A.E., Semochkina I.Yu. Ensuring reliability in the life cycle of artificial intelligence systems for responsible purposes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):12–20. (In Russ.)
25. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Savinov K.N., Eremenko R.V. Virtual enhancement of the effect of parallelization of computing during the transition from binary neurons to the use of q-ary artificial neurons. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):89–97. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Юрьевич Михеев

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

Олег Владимирович Прокофьев

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

Ирина Юриевна Семочкина

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

Mikhail Yu. Mikheev

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

Oleg V. Prokofiev

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

Irina Yu. Semochkina

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.01.2025

Поступила после рецензирования/Revised 28.02.2025

Принята к публикации/Accepted 10.03.2025

ГЕНЕЗИС РИСКОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

О. В. Прокофьев

Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
Prokof_ow@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Многие исследования искусственного интеллекта с момента его создания посвящены изучению множества проблем и подходов для автономной работы в областях применения, связанных со здоровьем и жизнью человека. Представлено описание происхождения рисков, систематизации способов их проявления для построения систем ответственного назначения. *Материалы и методы.* Поскольку исследования в этой области пока не опираются на большой опыт внедрения, обсуждаемые источники рисков являются обобщением экспертных оценок авторитетных разработчиков и приведены на примере систем автономных вооружений. *Результаты.* Выявлены основные источники возникновения рисков, траектории их развития для различных вариантов причинно-следственной трансформации. *Выводы.* Сформулированы направления совершенствования процессов тестирования и отладки автономных систем ответственного назначения с точки зрения развития и формирования рисков применения.

Ключевые слова: риски искусственного интеллекта, генезис рисков, автономные системы, системы ответственного назначения

Для цитирования: Прокофьев О. В. Генезис рисков искусственного интеллекта и их реализация в автономных системах ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 20–27. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-3

GENESIS OF RISKS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND THEIR IMPLEMENTATION IN AUTONOMOUS SYSTEMS FOR RESPONSIBLE PURPOSE

O.V. Prokofiev

Penza State Technological University, Penza, Russia
Prokof_ow@mail.ru

Abstract. *Background.* Much research on artificial intelligence (AI) since its inception has been devoted to exploring a variety of problems and approaches for autonomous operation in application areas related to human health and life. The article is devoted to describing the origin of risks, systematizing the ways they manifest themselves in order to build systems for responsible purposes. *Materials and methods.* Since research in this area is not yet based on extensive implementation experience, the sources of risks discussed are a generalization of expert assessments of authoritative developers and are given as an example of autonomous weapons systems. *Results.* The main sources of risks and the trajectories of their development for various variants of cause-and-effect transformation have been identified. *Conclusions.* Directions for improving the processes of testing and debugging autonomous systems for critical purposes are formulated from the point of view of development and formation of application risks.

Keywords: risks of artificial intelligence, genesis of risks, autonomous systems, critical systems

For citation: Prokofiev O.V. Genesis of risks of artificial intelligence and their implementation in autonomous systems for responsible purpose. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = Reliability and quality of complex systems. 2025;(1):20–27. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-3

Введение

Значительные достижения в области искусственного интеллекта (ИИ), наблюдаемые за последние годы, одновременно сопровождаются обоснованным ростом обеспокоенности о последствиях решений, принимаемых ИИ. Высокая скорость принятия решений, удешевление автономных систем по мере масштабирования производства, возможность собирать и обрабатывать большие объемы

информации привлекают будущих пользователей и бенефициаров внедрения систем. В ряде случаев предполагаемые пользователи высказывают мнение о том, что ИИ позволяет принять справедливые, объективные решения, свободные от влияния эмоций и неуверенности. В то же время управление автономными системами в транспорте, медицине, вооружениях несет в себе потенциальные риски, полный перечень которых невозможно предвосхитить. Вопросы этики, права, границ допустимых решений, принимаемых ИИ в автономных системах ответственного назначения, сегодня переходят из области теории в практическую область организации машинного обучения. Системное изложение происхождения рисков имеет важное применение с точки зрения тестирования и отладки автономных систем, особенно имеющих прямое отношение к здоровью и жизни человека. В данной статье в качестве примера выбрана предметная область автономных систем вооружений, наиболее значимая с точки зрения возможного ущерба. Быстрое развитие автономных систем с ИИ, закрытый статус многих разработок и непрозрачность процесса формирования критически важного решения в самих системах – это далеко не полный перечень причин, из-за которых данные в области исследования собираются на основе опроса экспертов. В статье использованы числовые и порядковые результаты опроса респондентов, качественные оценки. Необходимо междисциплинарное исследование безопасности ИИ в диапазоне от экономики, права и философии до компьютерной безопасности, формальных методов логики и, конечно же, прикладных дисциплин для реализации ИИ. Целью работы стало исследование генезиса рисков ИИ на примере систем вооружения, систематизация и описание траекторий формирования потенциальных угроз.

Методология

Обобщая качественные оценки экспертами преимуществ автономных систем вооружений [1–12], были выявлены следующие конкретные и ожидаемые результаты:

1. Скорость, внезапность и живучесть. Например, автономный самолет может быть более искусным в выявлении и предотвращении угроз ПВО, например, лучше прогнозировать и побеждать противников в воздушном бою, что делает его более способным выполнить свою миссию.

2. Повышенная точность и уменьшенный побочный ущерб. Благодаря большей вычислительной мощности, лучшему доступу к информации и большей скорости, чем у людей, автономное оружие может более точно и быстро рассчитывать и предпринимать действия, которые повышают точность и минимизируют сопутствующий ущерб.

3. Машинное соблюдение правил и закона. В отличие от людей, ИИ может быть обучен для точного выполнения инструкций по ведению боя, а также он избавлен от действий, выполняемых на основе человеческих эмоций.

4. Уменьшение ущерба гражданскому населению. Будущие автономные системы могут преодолеть людей в различении комбатантов от гражданских лиц, тем самым уменьшая жертвы среди гражданского населения на войне.

5. Удаление людей с поля боя. Будущие войны с участием необитаемых машин сэкономят много человеческих жизней. Например, роботы по разминированию уже спасают человеческие жизни. Опасная работа делегируется агентам, не являющимся людьми.

Кроме того, в исследовании были использованы экспертные оценки института SIPRI [1–11], а также результаты статистического исследования корпорации вооружений RAND в форме опроса, проведенного среди 29 специалистов по военному применению ИИ [12]. Примеры высказанных экспертами озабоченностей о последствиях применения автономных вооружений представлены на рис. 1, 2.

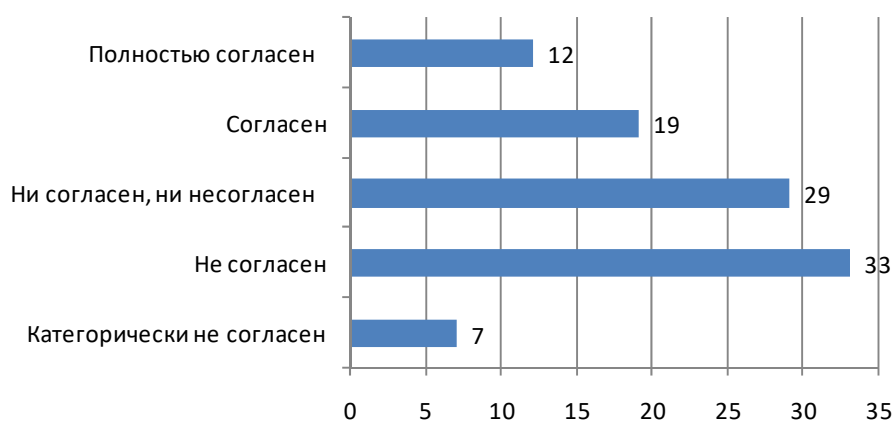


Рис. 1. Автономное оружие чаще совершает ошибки, чем люди (% опрошенных)

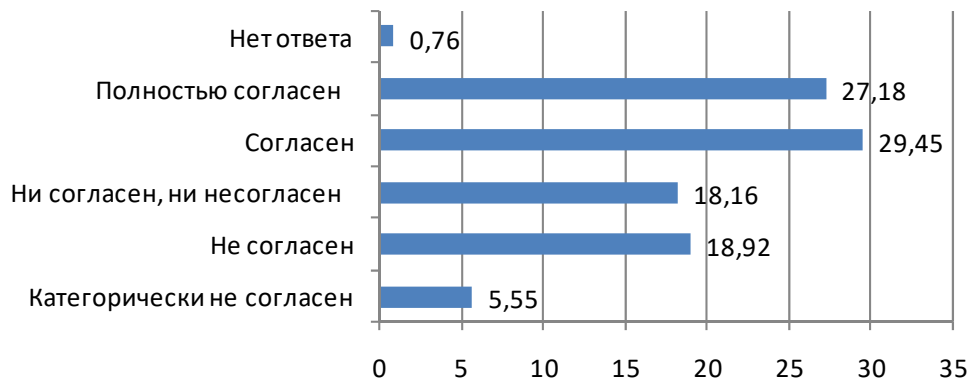


Рис. 2. Автономное оружие должно быть запрещено с этической точки зрения, поскольку его нельзя привлечь к ответственности за неправомерные действия (% опрошенных)

Результаты

Автономные системы вооружения действуют как «мультипликатор угрозы», активируя пути для различных рисков, как показано на рис. 3. Эти пути не исчерпывают весь спектр рисков, но помогают проиллюстрировать различные способы, которыми ученые и эксперты по этому вопросу в настоящее время обоснованно показывают, что автономное оружие может представлять серьезную угрозу для человечества.

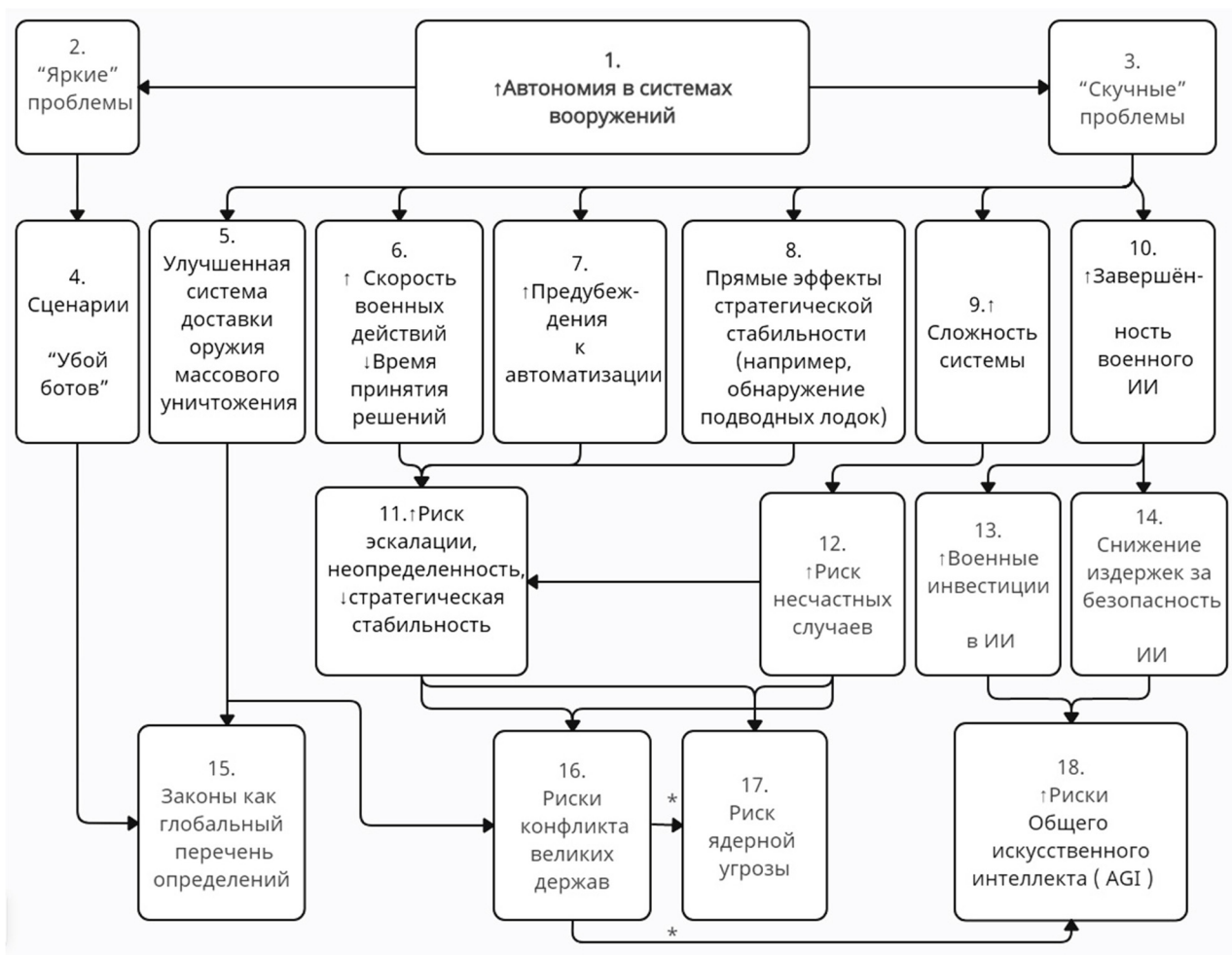


Рис. 3. Сценарии (траектории) происхождения рисков

Траектория I: «Боевой робот». Относится к «ярким» проблемам, которым уделяется гораздо больше внимания в средствах массовой информации. Соответствует путь обхода иерархической

структуры на рис. 3, по блокам с номерами 1, 2, 4, 15. В работе [13] утверждается, что боевые роботы с роевым алгоритмом поведения являются наиболее экономичным оружием массового поражения. Соотношение «Затраты/Эффективность» при массовом производстве приближенно автономных устройств оценивается как стоимость одного погибшего \$400 (2020 г.), стоимость гибели 100 000 человек (сопоставимая с ядерным ударом по городу среднего размера) составит 40 миллионов долларов и, как ожидается, в будущем снизится. Покупка относительно дешевых подвижных устройств и программного обеспечения (например, алгоритмов роя и программного обеспечения для распознавания лиц) может позволить некоторым субъектам компенсировать военную слабость, дестабилизируя международную систему. Эта угроза, как и далее перечисленные, заслуживает не только разработки технических мер противодействия (например, блокирования коммуникаций роя), но и правовой, этической экспертизы.

Траектория II: «Системы доставки оружия массового поражения (ОМП)». Сценарий описывается блоками с номерами 1, 3, 5, 15, 16, 17, 18. Автономные транспортные средства – это эффективный способ доставки химического, радиологического и биологического оружия. Они могут более точно нацеливаться на врагов, корректируя траектории в зависимости от местных условий ветра и влажности. Кроме того, небольшие устройства могут подниматься в воздух, летать внутри помещений и совместно совершать атаки. Системы доставки могут давать дестабилизирующие последствия применительно к доставке ядерного оружия. Они более склонны к потере контроля со стороны человека из-за неисправности, взлома или подделки, что может привести к случайному использованию ядерного оружия. Автономные системы более склонны к непредсказуемому поведению или сбоям, взлому или спуфинг-атакам, тогда может возникнуть риск несчастных случаев и непреднамеренной эскалации ситуации. Программируемые автономные системы коммерчески доступны и, таким образом, представляют собой легкодоступный метод, который не подвергает опасности собственно боевиков террористической группы при проведении радиологической, биологической или химической атаки. Для полного понимания рисков, связанных с доставкой оружия массового уничтожения, необходимы дополнительные исследования, следует изучить стратегические риски и проявления потенциального вмешательства.

Траектория III: «Война на скорости машины». Сценарий описывается блоками с номерами 1, 3, 7, 11, 16, 17, 18. Термин «скорость машины» используется потому, что автономные системы могут обрабатывать информацию и принимать решения быстрее, чем люди. Это может сократить время принятия решений, что, в свою очередь, может увеличить риски несчастных случаев и непреднамеренной эскалации как на поле боя, так и при принятии стратегических решений. Преимущества скорости стимулируют принятие решений великими державами до такой степени, что военные теоретики предсказывают новый вид войны, характеризующийся экстремальными скоростями, неподвластными человеческому контролю. Это известно как «гипервойна» или «сингулярность поля боя». Известны исторические факты, когда поспешные решения, подсказываемые автоматизированной системой, могли послужить началом ядерной войны. Если автоматизация и системы раннего предупреждения с поддержкой искусственного интеллекта могут сократить время, необходимое для обнаружения входящей атаки (до принятия решения), и сократить время, необходимое для начала атаки (после принятия решения), то время принятия решения, обращения к здравому смыслу может быть увеличено.

Траектория IV: «Предвзятость к автоматизации». Сценарий описывается блоками с номерами 1, 3, 7, 11, 16, 17, 18. В парах человек-машина люди, скорее всего, будут предвзято относиться к суждениям машины, даже при наличии противоречивых доказательств. Другими словами, предвзятость автоматизации определяется как тенденция «чрезмерно воспринимать компьютерную информацию как эвристическую замену бдительного поиска и обработки информации». При ненадежной системе некоторые люди склонны одобрять рекомендации, сгенерированные компьютером. В мире с более автономными системами люди могут быть предвзяты в отношении обнаружения ложных тревог и ошибок в смертоносных системах с поддержкой ИИ, включая «более умные» системы раннего предупреждения. К сожалению, создание более сложных и менее подверженных ошибкам систем искусственного интеллекта может не решить проблему предвзятости автоматизации, а может даже усугубить ее. Высокий уровень точности системы может непреднамеренно способствовать систематической ошибке автоматизации. Это может быть связано с тем, что точность порождает доверие, и было показано, что пользователи, которые больше доверяют автоматизации, с меньшей вероятностью обнаруживают сбой в автоматизации. По этим причинам предвзятость к автоматизации может оказаться одним из самых коварных «скучных» рисков увеличения автономности систем вооружения и автоматизации в целом.

Совершают ли пары человек-машина меньше ошибок в критических ситуациях, чем люди в одиночку? Ответы на такие риторические вопросы будут иметь большую информационную ценность.

Траектория V: «Прямые последствия стратегической стабильности». Сценарий описывается блоками с номерами 1, 3, 8, 11, 16, 17, 18 и характеризуется опасностью непреднамеренной эскалации. Существует потенциальная возможность того, что по результатам автономного дистанционного зондирования и распределенного поиска будет использовано автономное вооружение. Достижения в области искусственного интеллекта могут вызвать изменения в ядерных доктринах государств, допускающие автоматизацию запусков ядерного оружия.

Траектория VI: «Риски, связанные со сложностью систем». Сценарий описывается блоками с номерами 1, 3, 9, 12, 11, 16, 17, 18. Теория обычных аварий системы предполагает, что по мере увеличения сложности системы увеличивается и риск аварий и что некоторый уровень аварий неизбежен в сложных системах, кроме того, риск аварий в автономном оружии, поэтому системы могут быть выше. Алгоритмический хаос и неожиданная эскалация будут иметь катастрофические последствия для автономных систем на войне. Например, один рой подвижных устройств может неожиданно ошибочно истолковать микродвижения роя противника как «возможно враждебные», принять немного более оборонительную последовательность, которую второй рой может затем интерпретировать как «возможно враждебные», занять более враждебную позицию, в свою очередь, только подтверждая интерпретацию первого роя как «враждебную» и т.д., развиваясь по спирали в сторону эскалации. Похожая динамика может наблюдаться и на других уровнях конфликта, включая принятие стратегических решений государствами с помощью систем поддержки принятия решений на базе искусственного интеллекта.

Траектория VII: «Конкурс военного ИИ». Сценарий описывается блоками с номерами 1, 3, 10, 13, 14, 18. У государств есть стимулы, например, желание показаться технологически продвинутыми как противникам, так и внутренней аудитории – делать вид, что система имеет более высокую степень автономии, чем она есть на самом деле. Государство может интерпретировать «фальшивую» автономную систему противника как свидетельство реального превосходства и в результате принять решение инвестировать больше средств в сам военный ИИ. Таким образом, государство может спровоцировать динамику, подобную гонке вооружений. Можно столкнуться с конкурентом, который (по предположениям) с большей готовностью делегирует полномочия машинам, и по мере того, как эта конкуренция развивается, придется принимать соответствующие решения.

Обсуждение

Общественное мнение склоняется к тому, что автономные системы с ИИ могут принести беспрецедентную пользу, и поэтому стоит изучить, как максимизировать эти выгоды, избегая при этом потенциальных ловушек. Перечисленные закономерности в процессе генезиса рисков вовсе не означают того, что общественность однозначно будет добиваться всеобщего запрета этих систем. Приведем ряд доводов о практической нереализуемости формального полного запрета.

1. Запреты на тот или иной вид оружия соблюдаются при наличии сомнений в эффективности или присутствии вредных последствий, побочных эффектов. Остальные запреты в странах мира зачастую нарушаются.

2. Запрет на программное обеспечение для автономных систем сложно проверить. Принципиально, что отличает автономное оружие от дистанционно пилотируемого устройства, так это программное обеспечение; обе системы «выглядят» одинаково и могут вести себя (вне боевой задачи) одинаково, что создает большие трудности для проверки на основе договоров.

3. Граница между автономными и автоматизированными системами размыта, терминология в этой области вызывает дискуссии [13] и постановка задачи недостаточно четко сформулирована.

4. ИИ используется в разных областях. В отличие от некоторых запрещенных военных технологий, таких как наземные мины, ИИ представляет собой «технологии общего назначения», которую коммерческие и другие частные субъекты интегрируют в современную жизнь. Это усложняет контроль за его использованием.

5. Автономные системы обеспечивают военные преимущества. Автономия и применение ИИ на поле боя могут представляться выгодными в военном отношении. Исторически сложилось, что запреты лучше всего работали в отношении оружия, которое не считалось решающим [13].

6. Страны мира, располагающие наиболее мощными армиями, не выступали на международных площадках с идеей полного запрета автономных систем вооружений.

Заключение

На оперативном уровне компьютерные исследования для создания надежного ИИ должны продолжаться по направлению верификации: как доказать, что система удовлетворяет определенным желаемым формальным свойствам («Правильно ли я построил систему?») [14–17]. На уровне стратегического управления стоит задача построения сценария (прогноза) для случая комплексного применения таких систем. Имитационное моделирование (квазиэкспериментальный метод, «варгейминг») используется для статистического оценивания сценариев уже сегодня и имеет перспективу применения для моделирования поведения автономных систем ответственного назначения. Методы количественного анализа позволяют перейти к оценке качества принимаемых решений, поможет ответить на ряд вопросов. Насколько серьезным будет влияние автоматизации в боевых ситуациях с автономным оружием? Как скорость моделируемой войны влияет на качество решений при использовании автономных систем? Является ли эскалация более или менее вероятной, когда задействованные системы являются автономными? Насколько доверяют участники необоснованным заявлениям о том, что противник развернул летальные автономные системы? Например, в исследовании [13] выявили 53 аналитических центра и другие организации, чья работа, вероятно, имеет отношение к исследованиям автономного оружия, но только девять активно работают над стратегическими рисками, связанными с автономией. В данном случае экономические затраты на исследования в области снижения рисков означают высокую отдачу в виде спасенных жизней людей в будущем, что подтверждается независимыми исследователями и международными организациями [18–27].

Список литературы

1. Boulanin V., Saalman L., Topychkanov P. [et al.]. Artificial Intelligence, Strategic Stability and Nuclear Risk. 2020. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-06/artificial_intelligence_strategic_stability_and_nuclear_risk.pdf
2. Integrating Cybersecurity and Critical Infrastructure. National, Regional and International Approaches / ed. by L. Saalman. 2018. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
3. The Impact of Artificial Intelligence on Strategic Stability and Nuclear Risk. Vol. I. Euro-Atlantic Perspectives / ed. by V. Boulanin. 2020. URL: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/artificial-intelligence-strategic-stability-and-nuclear-risk>
4. Boulanin V., Verbruggen M. Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems. 2020. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
5. Boulanin V., Bruun L., Goussac N. Autonomous Weapon Systems And International Humanitarian Law. Identifying Limits and the Required Type and Degree of Human–Machine Interaction. 2021. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2021-06/2106_aws_and_ihl_0.pdf
6. Saalman L., Su F., Saveleva Dovgal L. Cyber Posture Trends in China, Russia, the United States and the European Union. 2022. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-12/2212_cyber_postures_0.pdf
7. Boulanin V. Mapping the development of autonomy in weapon systems. A primer on autonomy. 2017. URL: <https://www.sipri.org/sites/default/files/Mapping-development-autonomy-in-weapon-systems.pdf>
8. Boulanin V., Goussac N., Bruun L., Richards L. Responsible Military Use of Artificial Intelligence. Can the European Union Lead the Way in Developing Best Practice? 2020. URL: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/responsible-military-use-artificial-intelligence-can-european-union-lead-way-developing-best>
9. Boulanin V., Brockmann K., Richards L. Responsible Artificial Intelligence Research And Innovation For International Peace And Security. 2020. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-11/sipri_report_responsible_artificial_intelligence_research_and_innovation_for_international_peace_and_security_2011.pdf
10. Bromley M., Maletta G. The Challenge of Software and Technology Transfers to Non-Proliferation Efforts. Implementing and Complying with Export Controls. 2018. URL: <https://www.sipri.org/publications/2018/other-publications/challenge-software-and-technology-transfers-non-proliferation-efforts-implementing-and-complying>
11. Su F., Boulanin V., Turell J. Cyber-incident Management Identifying and Dealing with the Risk of Escalation. 2020. IPRI Policy Paper No. 55. URL: <https://www.sipri.org/publications/2020/sipri-policy-papers/cyber-incident-management-identifying-and-dealing-risk-escalation>
12. Morgan F. E., Boudreaux B., Lohn A. J. [et al.]. Military Applications of Artificial Intelligence Ethical Concerns in an Uncertain World. RAND Corporation, 2020. 202 p. URL: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR3139-1.html
13. Ruhl Ch. Autonomous weapon systems and military artificial intelligence (AI) applications report. 2022. URL: <https://www.founderspledge.com/research/autonomous-weapon-systems-and-military-artificial-intelligence-ai>
14. Research Priorities for Robust and Beneficial Artificial Intelligence: An Open Letter. Future of Life Institute. URL: https://futureoflife.org/data/documents/research_priorities.pdf (дата обращения: 09.03.2024).

15. Marr B. The 15 Biggest Risks Of Artificial Intelligence. URL: <https://www.forbes.com/sites/bernard-marr/2023/06/02/the-15-biggest-risks-of-artificial-intelligence/?sh=20c095a92706>
16. Pause Giant AI Experiments: An Open Letter. URL: <https://futureoflife.org/open-letter/pause-giant-ai-experiments/>
17. AI Ethics Code. URL: <https://ethics.a-ai.ru/> (дата обращения: 09.03.2024).
18. Delaborde A. Risk assessment of artificial intelligence in autonomous machines. 1st international workshop on Evaluating Progress in Artificial Intelligence (EPAI 2020) in conjunction with ECAI. URL: 2020. <https://hal.science/hal-03009978>
19. ICRC position on autonomous weapon systems. International Committee of the Red Cross. URL: <https://www.icrc.org/en/document/icrc-position-autonomous-weapon-systems>
20. Macrae C. Learning from the Failure of Autonomous and Intelligent Systems: Accidents, Safety and Sociotechnical Sources of Risk // SSRN Electronic Journal. 2021. doi: 10.2139/ssrn.3832621
21. Hindriks F., Veluwenkamp H. The risks of autonomous machines: from responsibility gaps to control gaps // Synthese. 2023. Vol. 201. doi: 10.1007/s11229-022-04001-5
22. Radanliev P., De Roure D., Maple C. [et al.]. Super forecasting the technological singularity risks from artificial intelligence // Evolving Systems. 2022. Vol. 13. P. 747–757. doi: 10.1007/s12530-022-09431-7
23. The risks of Lethal Autonomous Weapons. The Future of Life Institute. URL: <https://autonomousweapons.org/the-risks>
24. Asilomar AI Principles. The Future of Life Institute. URL: <https://futureoflife.org/open-letter/ai-principles/>
25. Artificial Intelligence Risk & Governance. By Artificial Intelligence/Machine Learning Risk & Security Working Group (AIRS). The Wharton School, The University of Pennsylvania, 2024. URL: <https://ai.wharton.upenn.edu/white-paper/artificial-intelligence-risk-governance/>
26. Skelton S. K. AI experts question tech industry's ethical commitments. TechTarget, 2024. <https://www.computer-weekly.com/feature/AI-experts-question-tech-industrys-ethical-commitments>
27. Иванов А. И., Иванов А. П., Савинов К. Н., Еременко Р. В. Виртуальное усиление эффекта распараллеливания вычислений при переходе от бинарных нейронов к использованию q-арных искусственных нейронов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 89–97.
28. Ширинкина Е. В. Механизм применения искусственного интеллекта в обучении // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 24–30.

References

1. Boulanin V., Saalman L., Topychkanov P. et al. *Artificial Intelligence, Strategic Stability and Nuclear Risk*. 2020. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-06/artificial_intelligence_strategic_stability_and_nuclear_risk.pdf
2. Saalman L. (ed.). *Integrating Cybersecurity and Critical Infrastructure. National, Regional and International Approaches*. 2018. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
3. Boulanin V. (ed.). *The Impact of Artificial Intelligence on Strategic Stability and Nuclear Risk. Vol. I. Euro-Atlantic Perspectives*. 2020. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/artificial-intelligence-strategic-stability-and-nuclear-risk>
4. Boulanin V., Verbruggen M. *Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems*. 2020. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
5. Boulanin V., Bruun L., Goussac N. *Autonomous Weapon Systems and International Humanitarian Law. Identifying Limits and the Required Type and Degree of Human–Machine Interaction*. 2021. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2021-06/2106_aws_and_ihl_0.pdf
6. Saalman L., Su F., Saveleva Dovgal L. *Cyber Posture Trends in China, Russia, the United States and the European Union*. 2022. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-12/2212_cyber_postures_0.pdf
7. Boulanin V. *Mapping the development of autonomy in weapon systems. A primer on autonomy*. 2017. Available at: <https://www.sipri.org/sites/default/files/Mapping-development-autonomy-in-weapon-systems.pdf>
8. Boulanin V., Goussac N., Bruun L., Richards L. *Responsible Military Use of Artificial Intelligence. Can the European Union Lead the Way in Developing Best Practice?* 2020. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/responsible-military-use-artificial-intelligence-can-european-union-lead-way-developing-best>
9. Boulanin V., Brockmann K., Richards L. *Responsible Artificial Intelligence Research And Innovation For International Peace And Security*. 2020. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-11/sipri_report_responsible_artificial_intelligence_research_and_innovation_for_international_peace_and_security_2011.pdf
10. Bromley M., Maletta G. *The Challenge of Software and Technology Transfers to Non-Proliferation Efforts. Implementing and Complying with Export Controls*. 2018. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2018/other-publications/challenge-software-and-technology-transfers-non-proliferation-efforts-implementing-and-complying>

11. Su F., Boulanin V., Turell J. *Cyber-incident Management Identifying and Dealing with the Risk of Escalation*. 2020. IPRI Policy Paper No. 55. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2020/sipri-policy-papers/cyber-incident-management-identifying-and-dealing-risk-escalation>
12. Morgan F.E., Boudreaux B., Lohn A.J. et al. *Military Applications of Artificial Intelligence Ethical Concerns in an Uncertain World*. RAND Corporation, 2020:202. Available at: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR3139-1.html
13. Ruhl Ch. *Autonomous weapon systems and military artificial intelligence (AI) applications report*. 2022. Available at: <https://www.founderspledge.com/research/autonomous-weapon-systems-and-military-artificial-intelligence-ai>
14. *Research Priorities for Robust and Beneficial Artificial Intelligence: An Open Letter*. Future of Life Institute. Available at: https://futureoflife.org/data/documents/research_priorities.pdf (data obrashcheniya: 09.03.2024).
15. Marr B. *The 15 Biggest Risks Of Artificial Intelligence*. Available at: <https://www.forbes.com/sites/bernard-marr/2023/06/02/the-15-biggest-risks-of-artificial-intelligence/?sh=20c095a92706>
16. *Pause Giant AI Experiments: An Open Letter*. Available at: <https://futureoflife.org/open-letter/pause-giant-ai-experiments/>
17. *AI Ethics Code*. Available at: <https://ethics.a-ai.ru/> (accessed 09.03.2024).
18. Delaborde A. *Risk assessment of artificial intelligence in autonomous machines. 1st international workshop on Evaluating Progress in Artificial Intelligence (EPAI 2020) in conjunction with ECAI*. Available at: 2020. <https://hal.science/hal-03009978>
19. *ICRC position on autonomous weapon systems*. International Committee of the Red Cross. Available at: <https://www.icrc.org/en/document/icrc-position-autonomous-weapon-systems>
20. Macrae C. Learning from the Failure of Autonomous and Intelligent Systems: Accidents, Safety and Sociotechnical Sources of Risk. *SSRN Electronic Journal*. 2021. doi: 10.2139/ssrn.3832621
21. Hindriks F., Veluwenkamp H. The risks of autonomous machines: from responsibility gaps to control gaps. *Synthese*. 2023;201. doi: 10.1007/s11229-022-04001-5
22. Radanliev P., De Roure D., Maple C. et al. Super forecasting the technological singularity risks from artificial intelligence. *Evolving Systems*. 2022;13:747–757. doi: 10.1007/s12530-022-09431-7
23. *The risks of Lethal Autonomous Weapons*. The Future of Life Institute. Available at: <https://autonomousweapons.org/the-risks>
24. *Asilomar AI Principles*. The Future of Life Institute. Available at: <https://futureoflife.org/open-letter/ai-principles/>
25. *Artificial Intelligence Risk & Governance*. By Artificial Intelligence/Machine Learning Risk & Security Working Group (AIRS). The Wharton School, The University of Pennsylvania, 2024. Available at: <https://ai.wharton.upenn.edu/white-paper/artificial-intelligence-risk-governance/>
26. Skelton S.K. *AI experts question tech industry's ethical commitments*. TechTarget, 2024. Available at: <https://www.computerweekly.com/feature/AI-experts-question-tech-industrys-ethical-commitments>
27. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Savinov K.N., Eremenko R.V. Virtual enhancement of the effect of parallelization of computing during the transition from binary neurons to the use of q-ary artificial neurons. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):89–97. (In Russ.)
28. Shirinkina E.V. The mechanism of application of artificial intelligence in teaching. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022. № 4. S. 24–30. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Владимирович Прокофьев

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

Oleg V. Prokofiev

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.12.2024

Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2025

Принята к публикации/Accepted 10.02.2025

КОРРЕКТНОЕ ЗАДАНИЕ ФУНКЦИЙ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ДИССИПАТИВНОЙ МАТРИЦЫ, ВХОДЯЩЕЙ В УРАВНЕНИЯ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

И. Е. Старостин

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Математическое моделирование процессов различной физической и химической природы – важнейший этап решения задач проектирования и эксплуатации различных физико-химических систем. Важнейшими требованиями к математическим моделям являются адекватность (т.е. не противоречивость физическим законам) и возможность задания требуемой точности (при наличии достаточного числа экспериментальных данных). Для построения математических моделей, удовлетворяющих упомянутым требованиям, автором был предложен в рамках механики, электродинамики и современной неравновесной термодинамики метод математического прототипирования энергетических процессов – единый подход моделирования процессов различной физической и химической природы. Для получения упомянутым методом уравнений динамики физических и химических процессов необходимо задать функции состояния для свойств веществ и процессов, в том числе и диссипативной матрицы, с точностью до экспериментально исследуемых коэффициентов. Диссипативная матрица должна быть положительно определенной (или невырожденной неотрицательной определенной в случае наличия в системе инерционности). Поэтому функция состояния диссипативной матрицы априори должна удовлетворять условию положительной определенности. Настоящая работа посвящена построению функций состояния диссипативной матрицы, удовлетворяющей условию положительной определенности (или невырожденности и неотрицательной определенности). *Материалы и методы.* Синтез уравнений динамики физических и химических процессов осуществляется на базе метода математического прототипирования энергетических процессов. Функции состояния для диссипативной матрицы строятся с использованием методов равномерного приближения функций и методов символьной регрессии. *Результаты.* Задание функций состояния диссипативной матрицы, входящей в уравнения метода математического прототипирования энергетических процессов, гарантирующих положительную определенность (или неотрицательную определенность с невырожденностью) диссипативной матрицы, гарантирует корректность задания упомянутых функций. *Выводы.* Предложенные в настоящей работе методы задания функций состояния для диссипативной матрицы, входящей в уравнения метода математического прототипирования энергетических процессов, позволяют сформировать класс корректных функций состояния для диссипативных матриц.

Ключевые слова: метод математического прототипирования энергетических процессов, диссипативная матрица, аппроксимация, символьная регрессия

Для цитирования: 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

CORRECT ASSIGNMENT OF STATE FUNCTIONS FOR THE DISSIPATE MATRIX INCLUDED IN THE EQUATIONS OF THE METHOD OF MATHEMATICAL PROTOTYPING OF ENERGY PROCESSES

I.E. Starostin

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

Abstract. *Background.* Mathematical modeling of processes of various physical and chemical nature is the most important stage in solving problems of design and operation of various physical and chemical systems. The most important requirement for mathematical models is adequacy (i.e. consistency with physical laws) and the possibility of

setting the required accuracy (given a sufficient number of experimental data). To construct mathematical models that meet the above requirements, the author proposed a method of mathematical prototyping of energy processes within the framework of mechanics, electrodynamics and modern non-equilibrium thermodynamics – a unified approach to modeling processes of various physical and chemical nature. To obtain the above method for the equations of the dynamics of physical and chemical processes, it is necessary to set the state functions for the properties of substances and processes, including the dissipative matrix, with an accuracy of up to the experimentally studied coefficients. The dissipative matrix must be positive definite (or non-degenerate non-negative definite in the case of inertia in the system). Therefore, the state functions of a dissipative matrix must a priori satisfy the condition of positive definiteness. This work is devoted to the construction of state functions of a dissipative matrix that satisfy the condition of positive definiteness (or non-degeneracy and non-negative definiteness). *Materials and methods.* The synthesis of equations of the dynamics of physical and chemical processes is carried out on the basis of the method of mathematical prototyping of energy processes. The state functions for the dissipative matrix are constructed using the methods of uniform approximation of functions and methods of symbolic regression. *Results.* The assignment of the state functions of the dissipative matrix included in the equations of the method of mathematical prototyping of energy processes, guaranteeing positive definiteness (or non-negative definiteness with non-degeneracy) of the dissipative matrix guarantees the correctness of the assignment of the mentioned functions. *Conclusions.* The methods proposed in this paper for specifying state functions for a dissipative matrix included in the equations of the method of mathematical prototyping of energy processes make it possible to form a class of correct state functions for dissipative matrices.

Keywords: method of mathematical prototyping of energy processes, dissipative matrix, approximation, symbolic regression

For citation: Starostin I.E. Correct assignment of state functions for the dissipative matrix included in the equations of the method of mathematical prototyping of energy processes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):28–35. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-4

Введение

Математические модели (ММ), воспроизводящие реальное поведение систем различной физической и химической природы, имеют важное значение для решения практических задач проектирования и эксплуатации технических систем [1–4], разработки медицинских методов [5], прогноза погоды [6], безопасности в чрезвычайных ситуациях [7] и т.д. Анализ физических и химических процессов в исследуемых системах имеет важное значение для построения математических моделей систем различной физической и химической природы, допускающих экстраполяцию на режимы работы системы, при которых имеется мало экспериментальных данных или последние отсутствуют вовсе [8]. Для анализа различных физико-химических процессов автором был предложен на основе механики, электродинамики, современной неравновесной термодинамики метод математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП) [9–15] – единый подход моделирования систем различной физической и химической природы. Благодаря этому модели полученные ММПЭП являются корректными, т.е. не противоречащими общим физическим законам (законам сохранения, началам термодинамики, механики, электродинамики и т.д.), а также физическим особенностям протекания процессов в различных системах [9–15].

Для реализации системы уравнений ММПЭП в численном виде необходимо с точностью до постоянных коэффициентов, исследуемых экспериментально, задать функции состояния для положительно определенной диссипативной матрицы и свободной энергии [9, 12–15]. Упомянутые функции состояния сколь угодно точно могут быть заданы в виде функциональных полиномов (аппроксимационная теорема Вейерштрасса [16]) [9, 12–14]. При этом функциональные разложения для диссипативной матрицы должны априори гарантировать ее положительную определенность (условие корректности функциональных разложений диссипативной матрицы), что гарантирует корректность модели [9, 12, 13]. Настоящая статья посвящена заданию корректных функциональных разложений диссипативной матрицы.

Материалы и методы

Синтез ММ системы в соответствии с ММПЭП осуществляется путем задания координат состояния $\mathbf{x}$ – величин, однозначно характеризующих состояние системы независимо от ее предыстории, с последующим определением потенциалов взаимодействия [9, 12, 14, 15]. Затем задаются координаты процессов, для которых определяются динамические силы – причины и необходимые условия протекания процессов различной физической и химической природы (рис. 1) [9, 12, 14, 15]. Независимо от динамических сил полная картина динамики системы определяется кинетическими

свойствами, «шкалой» которых является положительно определенная диссипативная матрица (рис. 1) [9, 12, 14, 15]. Приведенные факторы определяют динамику физических и химических процессов в системе, которая в свою очередь определяет динамику измеряемых и контролируемых параметров (рис. 1) [9, 12].

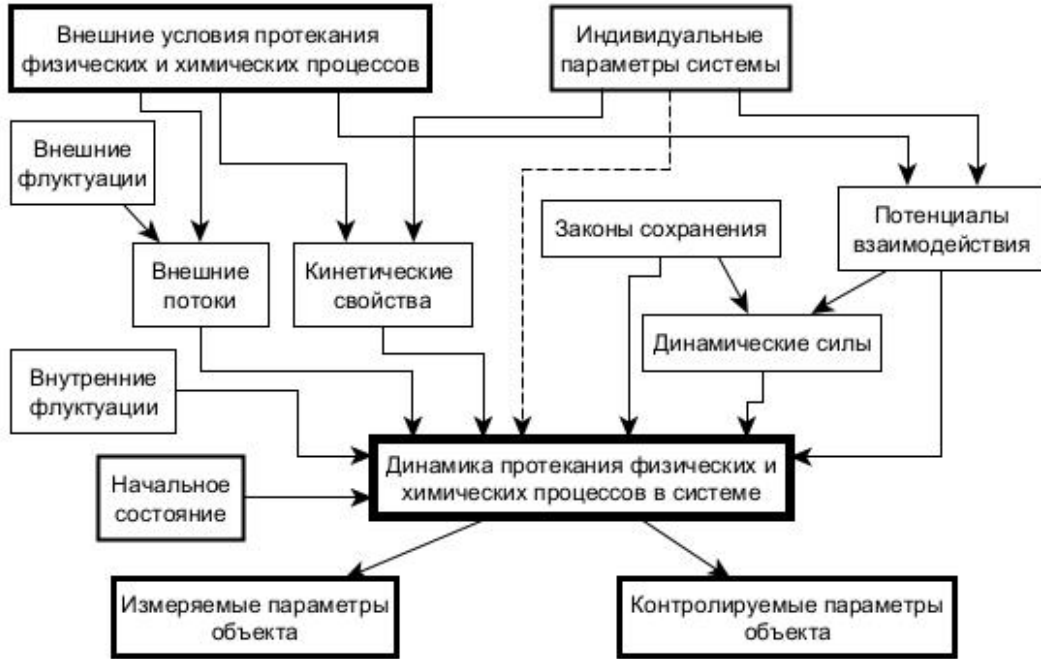


Рис. 1. Факторы, определяющие динамику физических и химических процессов

Функция состояния для положительно определенной диссипативной матрицы $A(x)$ задается в соответствии со следующим формализмом [9, 12, 13]:

1. Задаем разложение диссипативной матрицы $A(x)$ по положительно определенным матрицам $A_r(x)$, $r = \overline{1, N}$ (где N – число членов разложения по матрицам $A_r(x)$, $r = \overline{1, N}$) в виде

$$A(x) = \sum_{r=1}^N \gamma_r^T(x) A_r(x) \gamma_r(x), \quad (1)$$

где $\gamma_r(x)$, $r = \overline{1, N}$ – некоторые матрицы коэффициентов разложения диссипативной матрицы $A(x)$ по положительно определенным матрицам $A_r(x)$, $r = \overline{1, N}$.

2. Каждая положительно определенная матрица $A_r(x)$, $r = \overline{1, N}$ представляется в блочном виде

$$A_r(x) = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{l_{i,r},r}(x) & \alpha_{l_{i,r},r}(x) A_{m_r-l_{i,r},r}(x) \\ A_{m_r-l_{i,r},r}(x) \beta_{l_{i,r},r}(x) & A_{m_r-l_{i,r},r}(x) \end{pmatrix}, \quad r = \overline{1, N},$$

$$A_{m_r-l_{i,r},r}(x) = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{l_{i+1,r},r}(x) & \alpha_{l_{i+1,r},r}(x) A_{m_r-l_{i+1,r},r}(x) \\ A_{m_r-l_{i+1,r},r}(x) \beta_{l_{i+1,r},r}(x) & A_{m_r-l_{i+1,r},r}(x) \end{pmatrix},$$

$$i = 1, m_r^{(l)} - 1, A_{m_r^{(l)},r}(x) = A_{m_r^{(l)},r}(x), \sum_{i=1}^{m_r^{(l)}} l_{i,r} = m_r, \quad r = \overline{1, N}.$$

3. Определяем приведенные обратимые составляющие $\bar{a}_{l_{i,r},r}(x)$ положительно определенных матриц $A_r(x)$, $r = \overline{1, N}$:

$$\bar{\alpha}_{l_{i,r},r}(\mathbf{x}) = (\alpha_{l_{i,r},r}(\mathbf{x}) \mathbf{A}_{m_r-l_{i,r},r}(\mathbf{x}) + \beta_{l_{i,r},r}^T(\mathbf{x}) \mathbf{A}_{m_r-l_{i,r},r}^T(\mathbf{x})) (\mathbf{A}_{m_r-l_{i,r},r}(\mathbf{x}) + \mathbf{A}_{m_r-l_{i,r},r}^T(\mathbf{x}))^{-1}, \quad i=1, m_r^{(l)}-1, \quad r=\overline{1, N}.$$

4. Определяем матрицы $\tilde{\mathbf{A}}_{l_{i,r},r}(\mathbf{x})$, $i=1, m_r^{(l)}-1$, $r=\overline{1, N}$:

$$\tilde{\mathbf{A}}_{l_{i,r},r}(\mathbf{x}) = \Lambda_{l_{i,r},r}(\mathbf{x}) + \bar{\alpha}_{l_{i,r},r}(\mathbf{x}) \mathbf{A}_{m_r-l_{i,r},r}(\mathbf{x}) \bar{\alpha}_{l_{i,r},r}^T(\mathbf{x}), \quad i=1, m_r^{(l)}-1, \quad r=\overline{1, N}.$$

5. Для всех положительно определенных матриц $\Lambda_{l_{i,r},r}(\mathbf{x})$, $i=1, m_r^{(l)}$, $r=\overline{1, N}$, порядок которых больше 1, применяем итерации 1–4 настоящего алгоритма за исключением упомянутых матриц, описывающих электрические цепи. Последние задаются через положительные сопротивления [17], для которых задаются априори положительные функции состояния. Для остальных матриц $\Lambda_{l_{i,r},r}(\mathbf{x})$, $i=1, m_r^{(l)}$, $r=\overline{1, N}$, порядок которых равен 1 (положительных чисел), являющихся необратимыми составляющими [12, 15], задаем априори положительные функции состояния.

6. Задаем функции состояния для элементов матриц $\gamma(\mathbf{x})$ с индексами и элементов матриц обратимых составляющих $\alpha(\mathbf{x})$, $\beta(\mathbf{x})$ с индексами [12, 15].

Любая симметричная положительно определенная матрица может быть разложена в виде (1) по положительно-определенным матрицам первого порядка (положительным числам) [18]. Аналогично любую несимметричную матрицу можно разложить на симметричную и антисимметричную (а значит, на симметричную и кососимметричную положительно определенные матрицы), получив также представление (1) [12, 18].

Следует отметить, что приведенный формализм справедлив также и для невырожденных неотрицательно определенных диссипативных матриц [12, 13]. Неотрицательно определенные диссипативные матрицы встречаются в системах, содержащих инерционности, например, в механических системах, в электрических цепях, содержащих индуктивные элементы [12, 17].

На функции состояния элементов матриц $\alpha(\mathbf{x})$, $\beta(\mathbf{x})$ и $\gamma(\mathbf{x})$ с соответствующими индексами ограничений не накладывается [12], поэтому они могут быть заданы в виде функциональных разложений (по аппроксимационной теореме Вейерштрасса [16]) [9, 13]:

$$\alpha(\mathbf{x}) = \alpha^{(0)}(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^{N_a} c_k^{(a)} \Delta \alpha_k(\mathbf{x}), \quad \beta(\mathbf{x}) = \beta^{(0)}(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^{N_\beta} c_k^{(\beta)} \Delta \beta_k(\mathbf{x}), \quad (2)$$

$$\gamma(\mathbf{x}) = \gamma^{(0)}(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^{N_\gamma} c_k^{(\gamma)} \Delta \gamma_k(\mathbf{x}), \quad (3)$$

где $\alpha^{(0)}(\mathbf{x})$, $\beta^{(0)}(\mathbf{x})$, $\gamma^{(0)}(\mathbf{x})$ – базовые составляющие, вбирающие в себя все качественные особенности зависимости свойств веществ и процессов от состояния системы, а $\Delta \alpha_k(\mathbf{x})$, $k=\overline{1, N_a}$, $\Delta \beta_k(\mathbf{x})$, $k=\overline{1, N_\beta}$, $\Delta \gamma_k(\mathbf{x})$, $k=\overline{1, N_\gamma}$ – довесочные составляющие, уточняющие базовые составляющие $\alpha^{(0)}(\mathbf{x})$, $\beta^{(0)}(\mathbf{x})$, $\gamma^{(0)}(\mathbf{x})$ соответственно. Рассмотрим теперь необратимые составляющие $\Lambda(\mathbf{x})$ с индексами, представив их в виде

$$\Lambda(\mathbf{x}) = \theta(\bar{\Lambda}(\mathbf{x})), \quad \theta(\bar{\Lambda}) > 0, \quad \frac{d\theta(\bar{\Lambda})}{d\bar{\Lambda}} > 0, \quad \bar{\Lambda} \in \mathbb{R}, \quad (4)$$

где $\theta(\bar{\Lambda})$ – некоторая функция шкалы необратимой составляющей диссипативной матрицы, а $\bar{\Lambda}(\mathbf{x})$ с соответствующими индексами – приведенная необратимая составляющая. Как видно из выражения (4), на приведенные необратимые составляющие $\bar{\Lambda}(\mathbf{x})$ с индексами ограничений не наложено, а также в силу монотонности функции $\theta(\bar{\Lambda})$ величины $\Lambda > 0$ и $\bar{\Lambda} \in \mathbb{R}$ связаны между собой взаимно-однозначно [16]. Поэтому задание функции $\Lambda(\mathbf{x}) > 0$ с использованием (4) эквивалентно заданию для приведенной необратимой составляющей $\bar{\Lambda}(\mathbf{x})$ функциональных разложений, аналогичных (2) и (3):

$$\bar{\Lambda}(\mathbf{x}) = \bar{\Lambda}^{(0)}(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^{N_{\bar{\Lambda}}} c_k^{(\bar{\Lambda})} \Delta \bar{\Lambda}_k(\mathbf{x}), \quad (5)$$

где $\bar{\Lambda}^{(0)}(\mathbf{x})$ – базовая составляющая, вбирающая в себя все качественные особенности зависимости необратимой соответствующей составляющей $\Lambda(\mathbf{x})$ диссипативной матрицы от состояния системы, а $\Delta \bar{\Lambda}_k(\mathbf{x})$, $k = \overline{1, N_{\bar{\Lambda}}}$ – довесочные составляющие, уточняющие базовую составляющую $\bar{\Lambda}^{(0)}(\mathbf{x})$. Нетрудно видеть, что задание составляющих диссипативной матрицы в виде (2)–(5) позволит вобрать в себя особенности физических и химических процессов в рассматриваемой системе, гарантируя при этом положительность необратимых составляющих диссипативной матрицы, а значит, положительную ее определенность [9, 13].

Рассмотрим следующие виды функций (4) шкал диссипативных составляющих диссипативной матрицы:

– экспоненциальная шкала:

$$\theta(\bar{\Lambda}) = \Lambda_{\min} + \Lambda^* \exp(\lambda \bar{\Lambda}), \quad \Lambda_{\min} \geq 0, \quad \Lambda^* > 0, \quad \lambda > 0, \quad (6)$$

где $\Lambda_{\min}$ – некоторое минимальное значение положительной диссипативной составляющей $\Lambda(\mathbf{x})$;

Λ^* – экспоненциальный коэффициент; λ – коэффициент экспоненциального возрастания;

– логарифмическо-экспоненциальная шкала:

$$\theta(\bar{\Lambda}) = \Lambda_{\min} + \frac{\Lambda^*}{\lambda} \ln(1 + \exp(\lambda \bar{\Lambda})), \quad \Lambda_{\min} \geq 0, \quad \Lambda^* > 0, \quad \lambda > 0, \quad (7)$$

где $\Lambda_{\min}$ – некоторое минимальное значение положительной диссипативной составляющей $\Lambda(\mathbf{x})$;

Λ^* – коэффициент пропорциональности; λ – коэффициент нелинейности;

– сигмоидальная шкала:

$$\theta(\bar{\Lambda}) = \Lambda_{\min} + \frac{\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}}{1 + \exp(-\lambda \bar{\Lambda})}, \quad \Lambda_{\min} \geq 0, \quad \Lambda_{\max} > \Lambda_{\min}, \quad \lambda > 0, \quad (8)$$

где $\Lambda_{\min}$, $\Lambda_{\max}$ – некоторые минимальное и максимальное значения положительной диссипативной составляющей $\Lambda(\mathbf{x})$; λ – сигмоидальный коэффициент;

– линейно-сигмоидальная шкала:

$$\theta(\bar{\Lambda}) = \Lambda_{\min} + \frac{\Lambda^*}{\lambda} \ln \left(\frac{1 + \exp(\lambda \bar{\Lambda})}{1 + \exp(\lambda(\bar{\Lambda} - \bar{\Lambda}_{\text{сд}}))} \right), \quad \bar{\Lambda}_{\text{сд}} = \frac{\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}}{\Lambda^*}, \quad \Lambda_{\min} \geq 0, \quad \Lambda_{\max} > \Lambda_{\min}, \quad \Lambda^* > 0, \quad \lambda > 0, \quad (9)$$

где $\Lambda_{\min}$, $\Lambda_{\max}$ – некоторые минимальное и максимальное значения положительной диссипативной составляющей $\Lambda(\mathbf{x})$; Λ^* – коэффициент пропорциональности; λ – коэффициент нелинейности.

Как нетрудно видеть из уравнений (6)–(9), соответствующие функции шкал диссипативных составляющих положительные в силу положительности экспоненты, а также подлогарифмического выражения, большего единицы. Действительно, в случае (9) имеем

$$\frac{1 + \exp(\lambda \bar{\Lambda})}{1 + \exp(\lambda(\bar{\Lambda} - \bar{\Lambda}_{\text{сд}}))} - 1 = \frac{(1 - \exp(-\lambda \bar{\Lambda}_{\text{сд}})) \exp(\lambda \bar{\Lambda})}{1 + \exp(\lambda(\bar{\Lambda} - \bar{\Lambda}_{\text{сд}}))} > 0.$$

Также из уравнений (6)–(9) видно, что соответствующие функции шкал диссипативных составляющих монотонно возрастают с ростом $\bar{\Lambda}$ в силу монотонной возрастаемости функций $\exp(x)$ и $\ln(x)$. Действительно, в случае (9):

$$\frac{d}{d\bar{\Lambda}} \left(\frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{1 + \exp(\lambda \bar{\Lambda})}{1 + \exp(\lambda(\bar{\Lambda} - \bar{\Lambda}_{\text{сд}}))} \right) \right) = \frac{(1 - \exp(-\lambda \bar{\Lambda}_{\text{сд}})) \exp(\lambda \bar{\Lambda})}{(1 + \exp(\lambda \bar{\Lambda})) (1 + \exp(\lambda(\bar{\Lambda} - \bar{\Lambda}_{\text{сд}})))} > 0.$$

Таким образом, заданные в виде (6)–(9) функции шкал диссипативных составляющих диссипативных матриц удовлетворяют условиям (4). Рассмотрим более подробно свойства упомянутых функций шкал.

Функция шкал необратимых составляющих диссипативной матрицы, заданная в виде уравнений (6), (7), принимает значения в интервале $(\Lambda_{\min}, +\infty)$ и, соответственно, применима для задания необратимых составляющих диссипативной матрицы, не ограниченных сверху; а функции шкал необратимых составляющих, заданные в виде уравнений (8), (9), принимают значения в интервале $(\Lambda_{\min}, \Lambda_{\max})$ и, соответственно, применима для задания ограниченных сверху диссипативных составляющих. Более того, согласно уравнению (7) имеем

$$\theta(\bar{\Lambda}) = \Lambda_{\min} + \frac{\Lambda^*}{\lambda} \ln(1 + \exp(\lambda \bar{\Lambda})) = \Lambda_{\min} + \frac{\Lambda^*}{\lambda} \ln(1 + \exp(-\lambda \bar{\Lambda})) + \Lambda^* \bar{\Lambda},$$

т.е. в пределе при $\bar{\Lambda} \rightarrow +\infty$ заданная в виде (7) функция шкалы $\theta(\bar{\Lambda}) \rightarrow \Lambda^* \bar{\Lambda}$, т.е. к прямой пропорциональности. Таким образом, благодаря заданной в виде (7) функции шкалы необратимых составляющих диссипативной матрицы становится возможным задание приведенной составляющей, максимально передающей качественное поведение диссипативной составляющей. Это целесообразно для использования в выражении (5) положительных базисной и довесочных составляющих и при наложении ограничения положительности коэффициентов разложения (например, в случае использования полиномов Бернштейна [19]). Аналогичное касается и функции (8).

Функции шкал необратимых составляющих диссипативной матрицы, в частности обладающие свойствами соответствующих функций (6)–(9), могут быть также заданы и с использованием других функций.

Результаты

Итак, задание обратимых и необратимых составляющих диссипативной матрицы в виде (2)–(5) гарантирует корректное задание функции состояния для диссипативной матрицы по приведенному в настоящей работе формализму. А значит, гарантирует синтез корректных уравнений динамики процессов в системе при условии корректности задания функций состояния для прочих свойств веществ и процессов. Более того, выражения (2), (3), (5) могут быть заданы в любом базисе, что дает возможность задания класса гарантированно корректных моделей, в котором методами теории идентификации по экспериментальным данным строится модель [20]. В заданный класс моделей зашиваются и физические особенности конкретного класса систем (путем задания (2), (3), (5)).

Обсуждение

Корректное задание предложенным в настоящей статье способом диссипативной матрицы дает возможность корректного задания на основе ММПЭП класса уравнений динамики процессов различной физической и химической природы в рассматриваемой системе. Это дает основу единой методики синтеза цифровых двойников систем различной физической и химической природы [11]. Причем математическая основа цифровых двойников – либо аналитическая модель, получаемая путем численно-аналитического преобразования уравнений ММПЭП, либо сами уравнения ММПЭП (либо исходные, либо локально-упрощенные). Для получения аналитической модели достаточно ММПЭП получить качественный характер динамики процессов и проанализировать перекрестные связи [11]. Это дает возможность, задав класс аналитических моделей, методами теории идентификации [20] строить аналитическую модель [11].

Заключение

Использование ММПЭП с предложенным формализмом построения диссипативной матрицы для построения моделей систем различной физической и химической природы позволяет построить

класс корректных моделей рассматриваемой системы, сводя построение модели к известным методам теории идентификации.

Список литературы

1. Юревич 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. Гайдес М. А. Общая теория систем (системы и системный анализ). Винница : Глобус-Пресс, 2005. 210 с.
6. Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология. М. : Изд-во Московского университета, 2006. 582 с.
7. Акимов В. А. Научные основы общей теории безопасности // Технологии гражданской безопасности. 2017. Т. 14, № 4. С. 4–9.
8. Антонов А. В. Системный анализ. М. : Высш. шк., 2004. 454 с.
9. Khalyutin S. P., Starostin I. E., Agafonkina I. V. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development // *Energies*. 2023. № 16. P. 1933–1958. doi: 10.3390/en16041933
10. Старостин И. Е. Построение на основе интерполяции моделей различных физических и химических систем методом математического прототипирования энергетических процессов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 49–59. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-6
11. 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
12. Starostin I. E., Bykov V. I. Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamics. Raley, Noth Caroline, USA : Open Science Publishing, 2017. 229 p.
13. Starostin I. E., Khalyutin S. P., Bykov V. I. Setting the State functions for the properties of substances and processes in a differential form // *The Complex Systems*. 2022. № 1. P. 4–16.
14. Эткин В. А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). СПб. : Наука, 2008. 409 с.
15. Эткин В. А. Эргодинамическая теория эволюции биологических систем // Информационные процессы, системы и технологии. 2022. № 1. С. 12–24.
16. Ильин В. А., Садовничий В. А., Сендов Бл. Х. Математический анализ. Продолжение курса. М. : Изд-во Московского университета, 1967. 350 с.
17. Старостин И. Е., Халютин С. П., Докин К. К. Метод математического прототипирования энергетических процессов для электрических цепей // *Электропитание*. 2022. № 1. С. 41–49.
18. Канатников А. Н., Крищенко А. П. Линейная алгебра : учеб. для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 336 с.
19. Бернштейн С. Н. Собрание сочинений. М. : Изд-во академии наук СССР, 1952. Т. 1. 582 с.
20. Eykhoff P. Systems identification: parameters and state estimation. Eindhoven, Netherlands : University of technology, 1975. 680 p.

References

1. Yurevich E.I. *Osnovy proektirovaniya 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. Gaydes M.A. *Obshchaya teoriya sistem (sistemy i sistemnyy analiz) = General theory of systems (systems and system analysis)*. Vinnitsa: Globus-Press, 2005:210. (In Russ.)
6. Khromov S.P., Petrosyants M.A. *Meteorologiya i klimatologiya = Meteorology and climatology*. Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2006:582. (In Russ.)
7. Akimov V.A. Scientific foundations of the general theory of safety. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti = Technologies of civil safety*. 2017;14(4):4–9. (In Russ.)
8. Antonov A.V. *Sistemnyy analiz = System analysis*. Moscow: Vyssh. shk., 2004:454. (In Russ.)
9. Khalyutin S.P., Starostin I.E., Agafonkina I.V. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development. *Energies*. 2023;(16):1933–1958. doi: 10.3390/en16041933

10. Starostin I.E. Building models of various physical and chemical systems based on interpolation by mathematical prototyping of energy processes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):49–59. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-6
11. Starostin I.E., Gavrilin 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
12. Starostin I.E., Bykov V.I. *Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamics*. Raley, North Carolina, USA: Open Science Publishing, 2017:229.
13. Starostin I.E., Khalyutin S.P., Bykov V.I. Setting the State functions for the properties of substances and processes in a differential form. *The Complex Systems*. 2022;(1):4–16.
14. Etkin V.A. *Energodinamika (sintez teoriiy perenosa i preobrazovaniya energii) = Ergodynamics (synthesis of theories of energy transfer and transformation)*. Saint Petersburg: Nauka, 2008:409. (In Russ.)
15. Etkin V.A. Ergodynamic theory of the evolution of biological systems. *Informatsionnye protsessy, sistemy i tekhnologii = Information processes, systems and technologies*. 2022;(1):12–24. (In Russ.)
16. Il'in V.A., Sadovnichiy V.A., Sendov B.I.Kh. *Matematicheskiy analiz. Prodolzhenie kursa = Mathematical analysis. Continuation of the course*. Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1967:350. (In Russ.)
17. Starostin I.E., Khalyutin S.P., Dokin K.K. Method of mathematical prototyping of energy processes for electric circuits. *Elektroplitanie = Power supply*. 2022;(1):41–49. (In Russ.)
18. Kanatnikov A.N., Krishchenko A.P. *Lineynaya algebra: ucheb. dlya vuzov = Linear algebra textbook for universities*. Moscow: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2002:336. (In Russ.)
19. Bernshteyn S.N. *Sobranie sochineniy = Collected works*. Moscow: Izd-vo akademii nauk SSSR, 1952;1:582. (In Russ.)
20. Eykhoff P. *Systems identification: parameters and state estimation*. Eindhoven, Netherlands: University of technology, 1975:680.

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 15.12.2024

Поступила после рецензирования / Revised 25.12.2024

Принята к публикации / Accepted 15.01.2025

ЗАДАНИЕ ФУНКЦИЙ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ПРИВЕДЕННЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ И ПРИВЕДЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ, ВХОДЯЩИХ В УРАВНЕНИЯ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

И. Е. Старостин¹, С. И. Гавриленков²

^{1,2} Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия
¹ starostinigo@yandex.ru, ² gavrilencov@mstuca.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Основными требованиями к математическим моделям, применимым для решения практических задач современной техники и технологии, являются их точность и адекватность (т.е. не противоречивость физическим и химическим законам). Для построения таких моделей систем различной физической и химической природы был предложен в рамках механики, электродинамики и современной неравновесной термодинамики метод математического прототипирования энергетических процессов, дающий модели, не противоречащие общим физическим законам (законам термодинамики, механики и электродинамики) и физическим особенностям рассматриваемой системы. Для реализации уравнений упомянутого метода в численном виде необходимо корректно задать с точностью до экспериментально исследуемых постоянных коэффициентов функции состояния для свойств веществ и процессов, в частности, функций состояния для потенциалов взаимодействия, приведенных обратных теплоемкостей и приведенных тепловых эффектов – условию полного дифференциала энтропии и внутренних энергий. Заданию упомянутых функций состояния, удовлетворяющих упомянутым условиям, посвящена настоящая работа. *Материалы и методы.* Синтез уравнений динамики физических и химических процессов осуществляется на базе метода математического прототипирования энергетических процессов. Задание функций состояния для потенциалов взаимодействия, приведенных обратных теплоемкостей и приведенных тепловых эффектов осуществляется путем задания независимых составляющих упомянутых функций с последующим интегрированием необходимых и достаточных условий полного дифференциала энтропии и внутренних энергий. Упомянутые независимые составляющие строятся методами теории идентификации, в частности методами символьной регрессии. *Результаты.* Предложенная методика задания функций состояния для потенциалов взаимодействия, приведенных обратных теплоемкостей и приведенных тепловых эффектов дает корректные функции состояния упомянутых величин. *Выводы.* Предлагаемая методика построения функций состояния, удовлетворяющих упомянутым условиям полного дифференциала, сводит построение модели системы на основе метода математического прототипирования энергетических процессов к использованию классических методов идентификации (в частности методов символьной регрессии).

Ключевые слова: метод математического прототипирования энергетических процессов, функции состояния, условия полного дифференциала, корректность моделей

Для цитирования: 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

ASSIGNMENT OF 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

I.E. Starostin¹, S.I. Gavrilencov²

^{1,2} Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia
¹ starostinigo@yandex.ru, ² gavrilencov@mstuca.ru

Abstract. *Background.* The main requirements for mathematical models applicable to solving practical problems of modern engineering and technology are their accuracy and adequacy (i.e., non-contradiction with physical and

chemical laws). To construct such models of systems of various physical and chemical nature, a method of mathematical prototyping of energy processes was proposed within the framework of mechanics, electrodynamics and modern nonequilibrium thermodynamics, which yields models that do not contradict general physical laws (the laws of thermodynamics, mechanics and electrodynamics) and the physical features of the system under consideration. To implement the equations of the above-mentioned method in numerical form, it is necessary to correctly specify, with an accuracy of experimentally studied constant coefficients, the state function for the properties of substances and processes. In particular, the state functions for interaction potentials, reduced inverse heat capacities and reduced thermal effects – the condition of the total differential of entropy and internal energies. The present work is devoted to specifying the above-mentioned state functions that satisfy the above-mentioned conditions. *Materials and methods.* The synthesis of equations of the dynamics of physical and chemical processes is carried out on the basis of the method of mathematical prototyping of energy processes. The assignment of state functions for interaction potentials, reduced inverse heat capacities and reduced thermal effects is carried out by assigning independent components of the mentioned functions with subsequent integration of the necessary and sufficient conditions of the total differential of entropy and internal energies. The mentioned independent components are constructed by methods of identification theory, in particular by methods of symbolic regression. *Results.* The proposed method for specifying state functions for interaction potentials, reduced reciprocal heat capacities and reduced thermal effects gives correct state functions for the mentioned quantities. *Conclusions.* The proposed method for constructing state functions that satisfy the above-mentioned conditions of the total differential reduces the construction of a system model based on the method of mathematical prototyping of energy processes to the use of classical identification methods (in particular, symbolic regression methods).

Keywords: method of mathematical prototyping of energy processes, state functions, conditions of total differential, correctness of models

For citation: Starostin I.E., Gavrilin S.I. Assignment of 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 sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):36–43. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-5

Введение

Математические модели систем имеют важное значение для решения различных практических задач [1]. Одним из важнейших требований, предъявляемых к математическим моделям систем различной природы, является их корректность [1]. Корректность моделей систем различной физической и химической природы заключается в непротиворечивости таких моделей общим физическим законам (законам сохранения, началам термодинамики, механики, электродинамики, и т.д.), а также физическим особенностям рассматриваемых систем [1–3]. Для построения корректных упомянутых моделей авторами был предложен в рамках механики, электродинамики и современной неравновесной термодинамики метод математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП) – единый подход построения моделей систем различной физической и химической природы [2–8], позволяющий в том числе получать аналитические модели, также вбирающие в себя физику и химию рассматриваемой системы [5, 6]. Отсюда вытекает целесообразность использования математических моделей систем различной физической и химической природы, построенных ММПЭП, в качестве математического ядра цифровых двойников систем различной физической и химической природы [5, 6, 9].

Для задания в численном виде полученных ММПЭП моделей систем различной физической и химической природы необходимо корректно задать функции состояния для свойств веществ и процессов с точностью до экспериментально исследуемых постоянных коэффициентов [2, 4, 5]. Так, функции состояния для диссипативной матрицы должны удовлетворять условию положительной определенности [2, 4], а функции состояния для потенциалов взаимодействия, приведенных теплоемкостей и приведенных тепловых эффектов – условию полного дифференциала энтропии, внутренних энергий и энергий взаимодействия [2, 4]. Настоящая работа посвящена заданию функции состояния для потенциалов взаимодействия, приведенных теплоемкостей и приведенных тепловых эффектов, удовлетворяющих упомянутым условиям полного дифференциала [2, 4].

Материалы и методы

Система уравнений ММПЭП для общего случая систем различной физической и химической природы имеет вид [2]

$$dS = \sum_{i=1}^{m_U} \frac{\delta Q_i}{T_i}, \quad U = \sum_{i=1}^{m_U} U_i + \sum_{i=m_U+1}^{\bar{m}_U} \Phi_i, \quad (1)$$

$$d\Phi_i = -\sum_{k=1}^{m_x} X_{i,k}^{\circ} dx_k, \quad i = \overline{m_U+1, \bar{m}_U}, \quad (2)$$

$$dU_i = \delta Q_i - \sum_{k=1}^{m_x} X_{i,k} dx_k, \quad i = \overline{1, m_U}, \quad (3)$$

$$dx_k = \sum_{r=1}^{m_{\Delta x}} \alpha_{k,r} \delta \Delta x_r + (dx_k)_{ext} + (dx_k)_{ext}^{(cn)}, \quad k = \overline{1, m_x}, \quad (4)$$

$$\delta Q_i = \sum_{j=1}^{i-1} \delta Q_{i,j}^{(пер)} - \sum_{j=i+1}^{m_U} \delta Q_{i,j}^{(пер)} + \sum_{r=1}^{m_{\Delta x}} \beta_{i,r} \delta Q_r^{(нек)} + (\delta Q_i)_{ext} + (\delta Q_i)_{ext}^{(cn)}, \quad i = \overline{1, m_U}, \quad (5)$$

$$\delta Q_r^{(нек)} = \left(\sum_{k=1}^{m_x} \left(\sum_{l=1}^{m_U} X_{l,k} + \sum_{l=m_U+1}^{\bar{m}_U} X_{l,k}^{\circ} \right) \alpha_{k,r} \right) \delta \Delta x_r, \quad r = \overline{1, m_{\Delta x}}, \quad (6)$$

$$\Delta F_{\Delta x, r} = \left(\sum_{i=1}^{m_U} \beta_{i,r} \frac{T_i^*}{T_i} \right) \left(\sum_{k=1}^{m_x} \left(\sum_{l=1}^{m_U} X_{l,k} + \sum_{l=m_U+1}^{\bar{m}_U} X_{l,k}^{\circ} \right) \alpha_{k,r} \right), \quad r = \overline{1, m_{\Delta x}}, \quad (7)$$

$$\Delta F_{Q_i, j} = \frac{T_i^*}{T_i} - \frac{T_j^*}{T_j}, \quad j = \overline{1, i-1}, \quad i = \overline{2, m_U}, \quad (8)$$

$$\frac{\delta \Delta x_r}{dt} = \sum_{l=2}^{m_U} \sum_{g=1}^{l-1} A_{\Delta x, r}^{Q_{l,g}} \Delta F_{Q_{l,g}} + \sum_{q=1}^{m_{\Delta x}} A_{\Delta x, r}^{\Delta x, q} \Delta F_{\Delta x, q}, \quad r = \overline{1, m_{\Delta x}}, \quad (9)$$

$$\frac{\delta Q_{i,j}^{(пер)}}{dt} = \sum_{l=2}^{m_U} \sum_{g=1}^{l-1} A_{Q_{i,j}}^{Q_{l,g}} \Delta F_{Q_{l,g}} + \sum_{q=1}^{m_{\Delta x}} A_{Q_{i,j}}^{\Delta x, q} \Delta F_{\Delta x, q}, \quad j = \overline{1, i-1}, \quad i = \overline{2, m_U}, \quad (10)$$

$$d\varepsilon_i = \sum_{j=1}^{m_U} \tilde{C}_{i,j} dU_j + \sum_{k=1}^{m_x} \tilde{H}_{i,k} dx_k, \quad i = \overline{1, m_U}, \quad (11)$$

где U_i , $i = \overline{1, m_U}$ – внутренние энергии (ВЭ) энергетических степеней свободы (ЭСС) (число ЭСС m_U); x_k , $k = \overline{1, m_x}$ – прочие координаты состояния; Q_i , $i = \overline{1, m_U}$ – количества теплот, полученные ЭСС системы; $\alpha_{k,r}$, $k = \overline{1, m_x}$, $r = \overline{1, m_{\Delta x}}$ – коэффициенты матрицы баланса (получаются из законов сохранения); $(\delta Q_i / dt)_{ext}$, $(\delta Q_i / dt)_{ext}^{(cn)}$, $i = \overline{1, m_U}$ – внешние потоки теплоты к ЭСС системы и их случайные составляющие соответственно; $(dx_k / dt)_{ext}$, $(dx_k / dt)_{ext}^{(cn)}$, $k = \overline{1, m_x}$ – внешние потоки в систему прочих координат состояния и их случайные составляющие соответственно; $Q_{i,j}^{(пер)}$, $j = \overline{1, i-1}$, $i = \overline{2, m_U}$ – перенесенные между ЭСС теплоты; Δx_r , $r = \overline{1, m_{\Delta x}}$ – прочие координаты процессов; $Q_r^{(нек)}$, $r = \overline{1, m_{\Delta x}}$ – некомпенсированные теплоты, образующиеся в результате протекания физических и химических процессов (необратимый переход работы в теплоту); $\beta_{i,r} > 0$, $r = \overline{1, m_{\Delta x}}$, $i = \overline{1, m_U}$ – коэффициенты (доли) распределения некомпенсированных теплот по ЭСС, удовлетворяющие условию $\sum_{i=1}^{m_U} \beta_{i,r} = 1$, $r = \overline{1, m_{\Delta x}}$; $T_i > 0$, $i = \overline{1, m_U}$ – температуры (в общем случае отсутствия локального термодинамического равновесия неравновесные [3, 7, 8]) ЭСС; $X_{i,k}$, $k = \overline{1, m_x}$, $i = \overline{1, m_U}$ – прочие потенциалы взаимодействия (ПВЗ) ЭСС по координатам состояния x_k , $k = \overline{1, m_x}$; $X_{i,k}^{\circ}$, $k = \overline{1, m_x}$, $i = \overline{m_U+1, \bar{m}_U}$ – ПВЗ по координатам состояния x_k , $k = \overline{1, m_x}$, обусловленные взаимодействием между ЭСС; $\Delta x_{Q_{i,j}}$, $j = \overline{1, i-1}$, $i = \overline{2, m_U}$ – динамические силы, движущие процессы переноса теплоты между ЭСС; $\Delta x_{\Delta x, r}$, $r = \overline{1, m_{\Delta x}}$ – динамические силы, движущие прочие процессы; T^* – опорная температура, через которую задается свободная энергия системы W ; $\Delta A_{Q_{i,j}}^{Q_{l,g}}$, $g = \overline{1, l-1}$, $j = \overline{1, i-1}$, $i, l = \overline{2, m_U}$, $\Delta A_{Q_{i,j}}^{\Delta x, q}$, $q = \overline{1, m_{\Delta x}}$, $j = \overline{1, i-1}$, $i = \overline{2, m_U}$, $\Delta A_{\Delta x, r}^{Q_{l,g}}$, $g = \overline{1, i-1}$, $l = \overline{2, m_U}$, $r = \overline{1, m_{\Delta x}}$, $\Delta A_{\Delta x, r}^{\Delta x, q}$, $r, k = \overline{1, m_{\Delta x}}$ – коэффициенты положительно определенной диссипативной матрицы; S – энтропия системы; U – полная внутренняя энергия системы; Φ_i , $i = \overline{m_U+1, \bar{m}_U}$ – энергии взаимодействия между ЭСС (сюда же относятся и полная механическая энергия и энергия электромагнитного поля [2]); $\tilde{C}_{i,j}$, $i, j = \overline{1, m_U}$ – приведенные обратные

теплоемкости, а $\tilde{H}_{i,k}$, $k = \overline{1, m_x}$, $i = \overline{1, m_U}$ – приведенные тепловые эффекты. Для реализации системы (1)–(11) уравнений, полученной ММПЭП, необходимо задать в численном виде функции состояния для положительно определенной диссипативной матрицы, удовлетворяющей условию положительной определенности, ПВЗ по ЭСС, приведенных обратных теплоемкостей и приведенных тепловых эффектов ЭСС, удовлетворяющих условиям полного дифференциала энтропии и внутренних энергий ЭСС, а также ПВЗ по ЭСС, также удовлетворяющих условиям полного дифференциала энергий взаимодействия между ЭСС [2].

Полный дифференциал энтропии в силу (1) и (3) примет вид [4]

$$dS = \sum_{i=1}^{m_U} \left(\frac{1}{T_i} \right) dU_i + \sum_{i=1}^{m_x} \left(\sum_{k=1}^{m_U} \frac{X_{k,i}}{T_k} \right) dx_i. \quad (12)$$

Также в силу (11) имеем

$$dU_i = \sum_{j=1}^{m_U} C_{i,j} d\epsilon_j + \sum_{k=1}^{m_x} H_{i,k} dx_k, \quad i = \overline{1, m_U}, \quad (13)$$

где $C_{i,j}$, $i, j = \overline{1, m_U}$ – приведенные теплоемкости, в классическом случае сводящиеся к классическим теплоемкостям [4, 10]; $H_{i,k}$, $k = \overline{1, m_x}$, $i = \overline{1, m_U}$ – приведенные тепловые эффекты, в классическом случае сводящиеся к классическим тепловым эффектам [4, 10], определяемые в силу

$$\begin{pmatrix} C_{1,1} & \cdots & C_{1,m_U} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m_U,1} & \cdots & C_{m_U,m_U} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{C}_{1,1} & \cdots & \tilde{C}_{1,m_U} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}_{m_U,1} & \cdots & \tilde{C}_{m_U,m_U} \end{pmatrix}^{-1}, \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} H_{1,1} & \cdots & H_{1,m_x} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{m_U,1} & \cdots & H_{m_U,m_x} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \tilde{C}_{1,1} & \cdots & \tilde{C}_{1,m_U} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}_{m_U,1} & \cdots & \tilde{C}_{m_U,m_U} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{H}_{1,1} & \cdots & \tilde{H}_{1,m_x} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{H}_{m_U,1} & \cdots & \tilde{H}_{m_U,m_x} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Выражение (13) получено из выражения (11), исходя из предположения выбора приведенных внутренних энергий таким образом, что матрица теплоемкостей невырожденная [11]. Согласно выражениям (12) и (13) имеем окончательно

$$dS = \sum_{j=1}^{m_U} \left(\sum_{i=1}^{m_U} \frac{C_{i,j}}{T_i} \right) d\epsilon_j + \sum_{k=1}^{m_x} \left(\sum_{i=1}^{m_U} \frac{X_{i,k} + H_{i,k}}{T_i} \right) dx_k. \quad (16)$$

Согласно уравнениям (2) и (13) в силу условия полного дифференциала имеем

$$\left(\frac{\partial C_{i,j}}{\partial \epsilon_l} \right)_x = \left(\frac{\partial C_{i,l}}{\partial \epsilon_j} \right)_x, \quad j = \overline{1, l-1}, \quad l = \overline{2, m_U}, \quad i = \overline{1, m_U}, \quad (17)$$

$$\left(\frac{\partial C_{i,j}}{\partial x_k} \right)_\epsilon = \left(\frac{\partial H_{i,k}}{\partial \epsilon_j} \right)_x, \quad k = \overline{1, m_x}, \quad j = \overline{1, m_U}, \quad i = \overline{1, m_U}, \quad (18)$$

$$\left(\frac{\partial H_{i,k}}{\partial x_q} \right)_\epsilon = \left(\frac{\partial H_{i,q}}{\partial x_k} \right)_\epsilon, \quad k = \overline{1, q-1}, \quad q = \overline{2, m_x}, \quad i = \overline{1, m_U}. \quad (19)$$

$$\frac{\partial X_{i,k}^\circ}{\partial x_q} = \frac{\partial X_{i,q}^\circ}{\partial x_k}, \quad k = \overline{1, q-1}, \quad q = \overline{2, m_x}, \quad i = \overline{m_U + 1, \overline{m_U}}. \quad (20)$$

Согласно выражению (16) в силу условия полного дифференциала, учитывая выражения (17)–(19), имеем

$$\sum_{i=1}^{m_U} \frac{C_{i,j}}{T_i^2} \left(\frac{\partial T_i}{\partial x_k} \right)_\varepsilon = \sum_{i=1}^{m_U} \frac{1}{T_i} \left(\frac{X_{i,k} + H_{i,k}}{T_i} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \varepsilon_j} \right)_x - \left(\frac{\partial X_{i,k}}{\partial \varepsilon_j} \right)_x \right), \quad k = \overline{1, m_x}, \quad j = \overline{1, m_U}, \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^{m_U} \frac{1}{T_i} \left(\left(\frac{\partial X_{i,q}}{\partial x_k} \right)_\varepsilon - \frac{X_{i,q} + H_{i,q}}{T_i} \left(\frac{\partial T_i}{\partial x_k} \right)_\varepsilon \right) = \sum_{i=1}^{m_U} \frac{1}{T_i} \left(\left(\frac{\partial X_{i,k}}{\partial x_q} \right)_\varepsilon - \frac{X_{i,k} + H_{i,k}}{T_i} \left(\frac{\partial T_i}{\partial x_q} \right)_\varepsilon \right), \quad k = \overline{1, q-1}, \quad q = \overline{2, m_x}, \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^{m_U} \frac{C_{i,j}}{T_i^2} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \varepsilon_l} \right)_x = \sum_{i=1}^{m_U} \frac{C_{i,l}}{T_i^2} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \varepsilon_j} \right)_x, \quad j = \overline{1, l-1}, \quad l = \overline{2, m_U}. \quad (23)$$

В классическом случае выражения (17)–(23) сводятся к соответствующим классическим соотношениям полного дифференциала энтропии и ВЭ [10].

Выражения (2), (13) и (16) позволяют определить внутренние энергии ЭСС, энергии взаимодействия между ЭСС и энтропию с точностью до соответствующих постоянных аддитивных составляющих [12], так как на практике из экспериментальных данных можно получить лишь величины, определяющие частные производные энтропии, ВЭ и энергий взаимодействия между ЭСС [12]. Но и, как видно из выражений (1)–(11), для решения практических задач достаточно лишь частных производных упомянутых функций состояния [12]. Упомянутые частные производные, как видно из выражений (13) и (16)–(23), задаются через ПВЗ, приведенные теплоемкости и приведенные тепловые эффекты с учетом выражений (17)–(23) [4, 10, 12, 13].

Для того, чтобы задать ПВЗ, приведенные теплоемкости и приведенные тепловые эффекты, удовлетворяющие (17)–(23), необходимо решать дифференциальные уравнения в частных производных (17)–(23) [14]. По сути, рассматриваемая задача сводится к задаче восстановления скалярного потенциала векторного поля [15]. Как нетрудно видеть из выражений (13) и (16), аналитические решения уравнений (17)–(23) целесообразно искать путем задания функциональных разложений для функций энтропии и ВЭ, а также энергий взаимодействия между ЭСС [6, 16], так как в противном случае необходимо будет выполнять операцию интегрирования (в большинстве случаев численного) [15]. Частные производные упомянутых функций будут задаваться в виде частных производных компонентов упомянутых функциональных разложений [6, 16].

Упомянутые задания ВЭ, энергий взаимодействия между ЭСС и энтропии через функциональные разложения примут вид [6, 16]

$$S = \sum_{l=1}^{N_s} c_l^{(s)} \varphi_l^{(s)} \left(\left\{ \varepsilon_{j'}^{*(s)} \right\}_{j'=1}^{m_U^{(s)}}, \left\{ x_{k'}^{*(s)} \right\}_{k'=1}^{m_x^{*(s)}} \right) + \sum_{i=1}^{m_U} \gamma_i^{(s)} U_i + S^{(c)}, \quad (24)$$

$$U_i = \sum_{l=1}^{N_{U,i}} c_{i,l}^{(U)} \varphi_{i,l}^{(U)} \left(\left\{ \varepsilon_{j'}^{*(U)} \right\}_{j'=1}^{m_U^{(U)}}, \left\{ x_{k'}^{*(U)} \right\}_{k'=1}^{m_x^{*(U)}} \right) + U_i^{(c)}, \quad i = \overline{1, m_U}, \quad (25)$$

$$\Phi_i = \sum_{l=1}^{N_{\Phi,i}} c_{i,l}^{(\Phi)} \varphi_{i,l}^{(\Phi)} \left(\left\{ x_{k'}^{*(\Phi)} \right\}_{k'=1}^{m_x^{*(\Phi)}} \right) + \Phi_i^{(c)}, \quad i = \overline{m_U + 1, \overline{m_U}}, \quad (26)$$

$$\varepsilon_j^{*(s)} = \varepsilon_j^{(s)} \left(\left\{ \varepsilon_{j'}^{m_U} \right\}_{j'=1}^{m_U}, \left\{ x_{k'}^{m_x} \right\}_{k'=1}^{m_x} \right), \quad j = \overline{1, m_U^{*(s)}}, \quad (27)$$

$$x_k^{*(s)} = x_k^{(s)} \left(\left\{ x_{k'}^{m_x} \right\}_{k'=1}^{m_x} \right), \quad k = \overline{1, m_x^{*(s)}}, \quad (28)$$

$$x_{i,k}^{*(U)} = x_{i,k}^{(U)} \left(\left\{ x_{k'}^{m_x} \right\}_{k'=1}^{m_x} \right), \quad k = \overline{1, m_x^{*(U)}}, \quad i = \overline{1, m_U}, \quad (29)$$

$$x_{i,k}^{*(\Phi)} = x_{i,k}^{(\Phi)} \left(\left\{ x_{k'}^{m_x} \right\}_{k'=1}^{m_x} \right), \quad k = \overline{1, m_x^{*(\Phi)}}, \quad i = \overline{m_U + 1, \overline{m_U}}, \quad (30)$$

$$\varepsilon_{i,j}^{*(U)} = \varepsilon_{i,j}^{(U)} \left(\left\{ \varepsilon_{j'}^{m_U} \right\}_{j'=1}^{m_U}, \left\{ x_{k'}^{m_x} \right\}_{k'=1}^{m_x} \right), \quad j = \overline{1, m_U^{*(U)}}, \quad i = \overline{1, m_U}, \quad (31)$$

где в качестве функций φ с индексами можно взять, например, степенные полиномы [16] (теорема Вейерштрасса о равномерном приближении функции полиномами [16, 17]), а функции (27)–(31)

задаются для конкретной физико-химической системы; $S^{(c)} = \text{const}$ и $U_i^{(c)} = \text{const}$, $i = \overline{1, m_U}$, $\Phi_i^{(c)} = \text{const}$, $i = \overline{m_U + 1, \overline{m_U}}$ – вышеупомянутые аддитивные константы энтропии, ВЭ и энергий взаимодействия между ЭСС [12]; $\gamma_i^{(s)} \geq 0$, $i = \overline{1, m_U}$ – коэффициенты, гарантирующие положительность температур ЭСС (в общем случае нарушения локального термодинамического равновесия неравновесных [3, 7, 8]), определяемых, как частные производные энтропии по ВЭ соответствующих ЭСС при фиксированных значениях прочих координат состояния [3, 7, 8]; c – экспериментально исследуемые константы. Согласно выражениям (2), (13), (16), (24)–(31) имеем

$$C_{i,j} = \sum_{l=1}^{N_{U,l}} c_{i,l}^{(U)} \sum_{r=1}^{m_{U,l}^{(U)}} \left(\frac{\partial \varphi_{i,l}^{(U)}}{\partial \varepsilon_{i,r}^{*(U)}} \right)_{x^*} \left(\frac{\partial \varepsilon_{i,r}^{*(U)}}{\partial \varepsilon_j} \right)_x, \quad i, j = \overline{1, m_U}, \quad (32)$$

$$H_{i,k} = \sum_{l=1}^{N_{U,l}} c_{i,l}^{(U)} \left(\sum_{r=1}^{m_{U,l}^{(U)}} \left(\frac{\partial \varphi_{i,l}^{(U)}}{\partial \varepsilon_{i,r}^{*(U)}} \right)_{x^*} \left(\frac{\partial \varepsilon_{i,r}^{*(U)}}{\partial x_k} \right)_x + \sum_{r=1}^{m_{x,l}^{(U)}} \left(\frac{\partial \varphi_{i,l}^{(U)}}{\partial x_{i,r}^{*(U)}} \right)_{\varepsilon^*} \frac{\partial x_{i,r}^{*(U)}}{\partial x_k} \right), \quad k = \overline{1, m_x}, \quad i = \overline{1, m_U}, \quad (33)$$

$$X_{i,k}^o = - \sum_{l=1}^{N_{\Phi,l}} c_{i,l}^{(\Phi)} \sum_{r=1}^{m_{x,l}^{(\Phi)}} \frac{\partial \varphi_{i,l}^{(\Phi)}}{\partial x_{i,r}^{*(\Phi)}} \frac{\partial x_{i,r}^{*(\Phi)}}{\partial x_k}, \quad k = \overline{1, m_x}, \quad i = \overline{m_U + 1, \overline{m_U}}, \quad (34)$$

$$\sum_{i=1}^{m_U} \left(\frac{1}{T_i} - \gamma_i^{(s)} \right) C_{i,j} = \sum_{l=1}^{N_s} c_l^{(s)} \sum_{r=1}^{m_{U,l}^{(s)}} \left(\frac{\partial \varphi_l^{(s)}}{\partial \varepsilon_r^{*(s)}} \right)_{x^*} \left(\frac{\partial \varepsilon_r^{*(s)}}{\partial \varepsilon_j} \right)_x, \quad j = \overline{1, m_U}, \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^{m_U} \frac{X_{i,k}}{T_i} = \sum_{l=1}^{N_s} c_l^{(s)} \left(\sum_{r=1}^{m_{U,l}^{(s)}} \left(\frac{\partial \varphi_l^{(s)}}{\partial \varepsilon_r^{*(s)}} \right)_{x^*} \left(\frac{\partial \varepsilon_r^{*(s)}}{\partial x_k} \right)_x + \sum_{r=1}^{m_x^{(s)}} \left(\frac{\partial \varphi_l^{(s)}}{\partial x_r^{*(s)}} \right)_{\varepsilon^*} \frac{\partial x_r^{*(s)}}{\partial x_k} \right) - \sum_{i=1}^{m_U} \left(\frac{1}{T_i} - \gamma_i^{(s)} \right) H_{i,k}, \quad k = \overline{1, m_x}. \quad (36)$$

Выражения (32)–(34) явно определяют приведенные теплоемкости и приведенные тепловые эффекты, а также ПВЗ, обусловленные взаимодействием между ЭСС, соответственно. Соотношения (35) представляют собой систему линейных уравнений относительно обратных температур (в общем случае неравновесных). Причем в силу вышеупомянутой невырожденности матрицы приведенных теплоемкостей система (35) линейных уравнений относительно обратных температур имеет одно решение [11], которое численно может быть найдено методами численного решения систем линейных уравнений (методом Гаусса или итерационным) [18]. Затем, используя выражение (36), задав независимые ПВЗ по ЭСС, соответствующие k -й координате состояния [7], определяем остальные ПВЗ по ЭСС.

Также из выражения (35) видно, что неотрицательные коэффициенты $\gamma_i^{(s)} \geq 0$, $i = \overline{1, m_U}$ гарантируют положительность обратных температур (в общем случае неравновесных). Для этого необходимо задавать $\gamma_i^{(s)} \geq 0$, $i = \overline{1, m_U}$, исходя из минимума результатов решения системы линейных уравнений (35) относительно $\frac{1}{T_i} - \gamma_i^{(s)}$, $i = \overline{1, m_U}$. Такой минимум существует, так как в общем случае

функции состояния для ПВЗ, теплоемкостей и тепловых эффектов (в том числе и приведенных) задаются для ограниченного температурного диапазона, а также для ограниченной области прочих координат состояния (например, уравнение состояния и калорическое уравнение идеального газа) [10, 13], что гарантирует существование упомянутых минимумов [17]. В частности, в области низких температур задаются свои функции состояния [10, 13].

Результаты

Непосредственными преобразованиями возможно убедиться, что выражения (32)–(36) удовлетворяют условиям (17)–(23) полного дифференциала энтропии, ВЭ, а также энергий взаимодействия между ЭСС. Отсюда задание функций состояния для ПВЗ, обратных приведенных теплоемкостей и приведенных тепловых эффектов сводится к заданию в виде (27)–(31) функций состояния для замененных параметров состояния и выбору функций φ с индексами, которыми чаще всего будут степенные полиномы, радиально-базисные функции [16]. Такой выбор функций φ с индексами упрощает учет в выражениях (32)–(36) физических особенностей конкретной системы. Затем задаем в силу (32)–(36) функции состояния для ПВЗ, приведенных теплоемкостей и приведенных тепловых

эффектов. И наконец, мы в силу (14) и (15) определим приведенные обратные теплоемкости и приведенные тепловые эффекты, уже непосредственно используемые в системе уравнений динамики процессов различной физической и химической природы, полученной ММПЭП.

Обсуждение

Предложенная в настоящей работе методика задания функций состояния для ПВЗ, приведенных обратных теплоемкостей и приведенных тепловых эффектов, гарантирующая выполнение условий полного дифференциала энтропии, полного дифференциала ВЭ, а также полного дифференциала энергий взаимодействия между ЭСС, сводит экспериментальное исследование упомянутых функций состояния к классическим методам идентификации [19], в частности, к индукционным методам символьной регрессии [20], существенно упрощающим построение ММПЭП модели [5].

Заключение

Как уже отмечалось выше, задание функций состояния для ПВЗ, приведенных обратных теплоемкостей и приведенных тепловых эффектов через замененные параметры состояния гарантирует условия полного дифференциала энтропии, ВЭ и энергий взаимодействия между ЭСС. Это обуславливает задачу формирования класса функций замененных переменных, через которые определяются упомянутые характеристики системы.

Список литературы

1. Антонов А. В. Системный анализ. М. : Высш. шк., 2004. 454 с.
2. 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.
3. Эткин В. А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). СПб. : Наука, 2008. 409 с.
4. Starostin I. E., Khalyutin S. P., Bykov V. I. Setting the State functions for the properties of substances and processes in a differential form // The Complex Systems. 2022. № 1. P. 4–16.
5. 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
6. Старостин И. Е., Дружинин А. А. Аналитическое приближение решений уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов путем качественного анализа этих уравнений // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 22–31.
7. Starostin I. E., Bykov V. I. Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamics. Raley, Noth Caroline, USA : Open Science Publishing, 2017. 229 p.
8. Demirel Ya., Gerbaud V. Nonequilibrium Thermodynamics. Transport and Rate Processes in Physical, Chemical and Biological Systems, 3rd ed. Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 2014. 880 p.
9. Петров А. В. Имитация как основа технологии цифровых двойников // Вестник ИрГТУ. 2018. Т. 22, № 10. С. 56–66. doi: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66
10. Пригожин И., Дефей Р. Химическая термодинамика. Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1966. 512 с.
11. Беклемишев Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М. : Физматлит, 2005. 304 с.
12. Гуров А. А., Бадаев Ф. З., Овчаренко Л. П., Шаповал В. Н. Химия. М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2017. 777 с.
13. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика: теория равновесных систем. Термодинамика. М. : Едиториал УРСС, 2003. Т. 1. 240 с.
14. Мизохата С. Теория уравнений с частными производными. М. : Мир, 1977. 504 с.
15. Кочин Н. Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. М. : Наука, 1965. 424 с.
16. Дзядзык В. К. Введение в теорию равномерного приближения функции полиномами. М. : Наука, 1977. 512 с.
17. Ильин В. А., Садовничий В. А., Сендов Бл. Х. Математический анализ. Продолжение курса. М. : Изд-во Московского университета, 1967. 350 с.
18. Калиткин Н. Н. Численные методы. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 592 с.
19. Eykhoff P. Systems identification: parameters and state estimation. Eindhoven, Netherlands : University of technology, 1975. 680 p.
20. Стризов В. В. Методы индуктивного порождения регрессионных моделей. М. : Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, 2008. 56 с.

References

1. Antonov A.V. *Sistemnyy analiz = System analysis*. Moscow: Vyssh. shk., 2004:454. (In Russ.)
2. Starostin I.E., Khalyutin S.P., Parievskiy V.V. Types and forms of representation of the basic equations of the method of mathematical prototyping of energy processes. *Elektropitanie = Power supply*. 2022;(4):4–14. (In Russ.)
3. Etkin V.A. *Energodinamika (sintez teoriy perenosa i preobrazovaniya energii) = Energodynamics (synthesis of theories of energy transfer and transformation)*. Saint Petersburg: Nauka, 2008:409. (In Russ.)

4. Starostin I.E., Khalyutin S.P., Bykov V.I. Setting the State functions for the properties of substances and processes in a differential form. *The Complex Systems*. 2022;(1):4–16.
5. Starostin I.E., Gavrilencov 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
6. Starostin I.E., Druzhinin A.A. Analytical approximation of solutions to equations of the method of mathematical prototyping of energy processes by qualitative analysis of these equations. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):22–31. (In Russ.)
7. Starostin I.E., Bykov V.I. *Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamics*. Raley, Noth Caroline, USA: Open Science Publishing, 2017:229.
8. Demirel Ya., Gerbaud V. *Nonequilibrium Thermodynamics. Transport and Rate Processes in Physical, Chemical and Biological Systems, 3rd ed.* Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2014:880.
9. Petrov A.V. Imitation as the basis of digital twin technology. *Vestnik IrGTU = Bulletin of IrSTU*. 2018;22(10): 56–66. (In Russ.). doi: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66
10. Prigozhin I., Defey R. *Khimicheskaya termodinamika = Chemical thermodynamics*. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otделение, 1966:512. (In Russ.)
11. Beklemishev D.V. *Kurs analiticheskoy geometrii i lineynoy algebrы = Course of analytical geometry and linear algebra*. Moscow: Fizmatlit, 2005:304. (In Russ.)
12. Gurov A.A., Badaev F.Z., Ovcharenko L.P., Shapoval V.N. *Khimiya = Chemistry*. Moscow: Izd-vo MGTU im. Bauman, 2017:777. (In Russ.)
13. Kvasnikov I.A. *Termodinamika i statisticheskaya fizika: teoriya ravnovesnykh sistem. Termodinamika = Thermodynamics and statistical physics: theory of equilibrium systems. Thermodynamics*. Moscow: Editorial URSS, 2003;1:240. (In Russ.)
14. Mizokhata C. *Teoriya uravneniy s chastnymi proizvodnymi = Theory of partial differential equations*. Moscow: Mir, 1977:504. (In Russ.)
15. Kochin N.E. *Vektornoe ischislenie i nachala tenzornogo ischisleniya = Vector calculus and the beginnings of tensor calculus*. Moscow: Nauka, 1965:424. (In Russ.)
16. Dzyadzyk V.K. *Vvedenie v teoriyu ravnomernogo priblizheniya funktsii polinomami = Introduction to the theory of uniform approximation of a function by polynomials*. Moscow: Nauka, 1977:512. (In Russ.)
17. Il'in V.A., Sadovnichiy V.A., Sendov Bl.Kh. *Matematicheskiy analiz. Prodolzhenie kursa = Mathematical analysis. Continuation of the course*. Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1967:350. (In Russ.)
18. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011:592. (In Russ.)
19. Eykhoff P. *Systems identification: parameters and state estimation*. Eindhoven, Netherlands: University of technology, 1975:680.
20. 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.)

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

Станислав Иванович Гавриленков

заведующий учебной лабораторией кафедры электротехники и авиационного электрооборудования, Московский государственный технический университет гражданской авиации (Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)
E-mail: gavrilencov@mstuca.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)

Stanislav I. Gavrilencov

Head of the educational laboratory of the sub-department of electrical engineering and aviation electrical equipment, Moscow State Technical University of Civil Aviation (20 Kronshtadtskiy boulevard, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 10.12.2024

Поступила после рецензирования / Revised 23.12.2024

Принята к публикации / Accepted 12.01.2025

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

И. С. Галишников¹, Д. А. Аминев², Л. В. Бунина³, Д. В. Козырев⁴

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

^{2,3} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

⁴ Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

⁴ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

¹ galishnikov.ilya@yandex.ru, ² aminev.d.a@ya.ru, ³ ludmilabunina@mail.ru, ⁴ kozyrev-dv@rudn.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрен принцип распознавания объектов с использованием радиочастотной и оптической идентификации. *Материалы и методы.* Раскрыт состав системы гибридной идентификации, основными компонентами которой являются RFID-метки, RFID-считыватели, антенны, устройство фото- и видеофиксации, модуль сопряжения для передачи в центр обработки данных через телекоммуникационную сеть. Раскрыта структурная и электрическая монтажная электрические схемы системы гибридной идентификации. *Результаты и выводы.* Предложена методика расчета надежности системы и на основе данных эксплуатационной интенсивности отказов проведен расчет вероятности безотказной работы. Выявлены самые ненадежные элементы и выработаны рекомендации по повышению надежности посредством горячего резервирования микроконтроллеров. Предложены структурная схема надежности с учетом резервирования и обобщенный алгоритм работы системы распознавания объектов с использованием радиочастотной и оптической идентификации с учетом переключения основного и резервного микроконтроллеров во времени.

Ключевые слова: радиочастотный считыватель, микроконтроллер, идентификация, эксплуатационная интенсивность отказов, вероятность безотказной работы, резервирование

Финансирование: публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН (получатель Д. В. Козырев, разработка математической модели).

Для цитирования: Галишников И. С., Аминев Д. А., Бунина Л. В., Козырев Д. В. Определение надежности системы распознавания объектов с использованием гибридной идентификации // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 44–53. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-6

DETERMINING THE RELIABILITY OF AN OBJECT RECOGNITION SYSTEM USING HYBRID IDENTIFICATION

I.S. Galishnikov¹, D.A. Aminev², L.V. Bunina³, D.V. Kozyrev⁴

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

^{2,3} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

⁴ V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴ Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

¹ galishnikov.ilya@yandex.ru, ² aminev.d.a@ya.ru, ³ ludmilabunina@mail.ru, ⁴ kozyrev-dv@rudn.ru

Abstract. *Background.* The article considers the principle of object recognition using radio frequency and optical identification. *Materials and methods.* The composition of the hybrid identification system is disclosed, the main components of which are RFID tags, RFID readers, antennas, a photo and video recording device, an interface module for transmitting to the data processing center via a telecommunications network. The structural and electrical installation electrical circuits of the hybrid identification system are disclosed. *Results and conclusions.* A method for calculating the reliability of the system is proposed and, based on the operational failure rate data, the probability of failure-free operation is calculated. The most unreliable elements are identified and recommendations are developed for increasing reliability by hot standby of microcontrollers. A structural diagram of reliability taking into account the redundancy and a generalized algorithm for the operation of the object recognition system using radio frequency and optical identification are proposed taking into account the switching of the main and backup microcontrollers in time.

Keywords: radio frequency reader, microcontroller, identification, operational failure rate, probability of failure-free operation, redundancy

Financing: the publication was supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program (recipient D. V. Kozyrev, mathematical model development).

For citation: Galishnikov I.S., Aminev D.A., Bunina L.V., Kozyrev D.V. Determining the reliability of an object recognition system using hybrid identification. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1): 44–53. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-6

Введение

Система радиочастотной и оптической идентификации объекта предназначена преимущественно для определения движущихся транспортных средств и передачи сведений о них в центр обработки данных в режиме реального времени. Структурная схема такой системы представлена на рис. 1¹ [1–3].

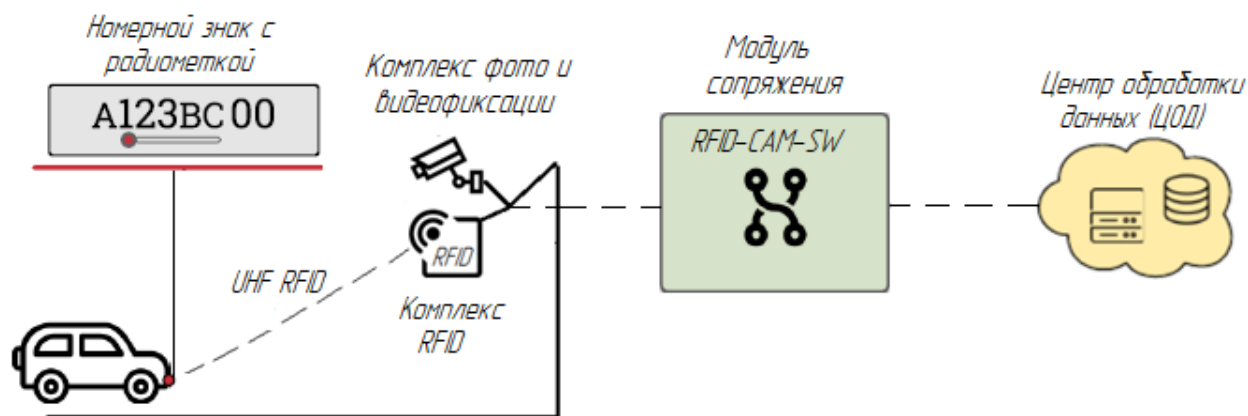


Рис. 1. Структурная схема системы гибридной идентификации

Основными компонентами такой системы являются RFID-метки, RFID-считыватели, антенны, устройство фото- и видеофиксации, телекоммуникационная сеть, модуль сопряжения и центр обработки данных. RFID-метки или транспондеры – это устройства, которыми оснащаются движущиеся объекты. Их назначение – передача записанного идентификатора считывателям. В данной системе применяются пассивные метки, без источника питания. RFID-считыватели – активные устройства, осуществляющие чтение идентификаторов меток и их передачу в центр обработки данных. Устройство фото- и видеофиксации передает в центр обработки данных фотографию движущегося объекта. Телекоммуникационная сеть используется для передачи данных о метках от считывателей в центр обработки данных, а также для доступа к считывателям для их настройки, обслуживания и мониторинга. Центр обработки данных включает информационную систему, в которой собираются данные о прочитанных метках и состоянии работы считывателей. Для взаимодействия комплекса RFID и комплекса фото- и видеофиксации используется модуль сопряжения. Он соединяет зоны контроля антенн RFID и зоны контроля комплекса видеофиксации, совмещает данные от камеры и RFID, а также взаимодействует с базой данных.

Поскольку данная гибридная система впоследствии будет применяться массово и устанавливаться в местах движения транспортных средств с целью выявления нарушений правил дорожного движения, важнейшей задачей является обеспечение ее надежной работы. Для этого необходимо сначала сформулировать исходные данные для расчета надежности, затем провести расчет показателей надежности по выбранной методике и выработать рекомендации по повышению этих показателей.

Исходные данные для расчета надежности

Исходными данными являются функциональная схема системы, схема электрическая монтажная, интенсивности отказов компонентов. На рис. 2 представлена функциональная схема системы распознавания объектов с использованием радиочастотной и оптической идентификации [4, 5]. На данной схеме показано, каким образом идентифицируется транспортное средство. RFID-считыватель

¹ Об утверждении Стратегии безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018–2024 годы : распоряжение Правительства Российской Федерации № 1-р. от 8 января 2018 г.

через антенны усиления создает электромагнитное поле (ЭМП). Когда метка попадает в зону ЭМП считывателя, на нее попадает высокочастотный сигнал – несущая, в простом случае это синусоида. Метка меняет коэффициент отражения сигнала, тем самым модулирует несущую. Считыватель получает значительно ослабленный, но некий информационный сигнал, и тем самым пытается извлечь из этого сигнала информацию, которую ему хочет сообщить метка. Как правило, метка сообщает свой идентификатор. Затем информация об идентификаторе метки через сетевой интерфейс микроконтроллера передается на модуль сопряжения. Параллельно с этим информацию об оптически распознанном номере транспортного средства передает на модуль сопряжения и комплекс фото- и видеофиксации семейства «Кордон» [5]. Модуль сопряжения проводит сравнение, ранжирование списков полученных номеров и передает полученную информацию в центр автоматической фиксации административных правонарушений.

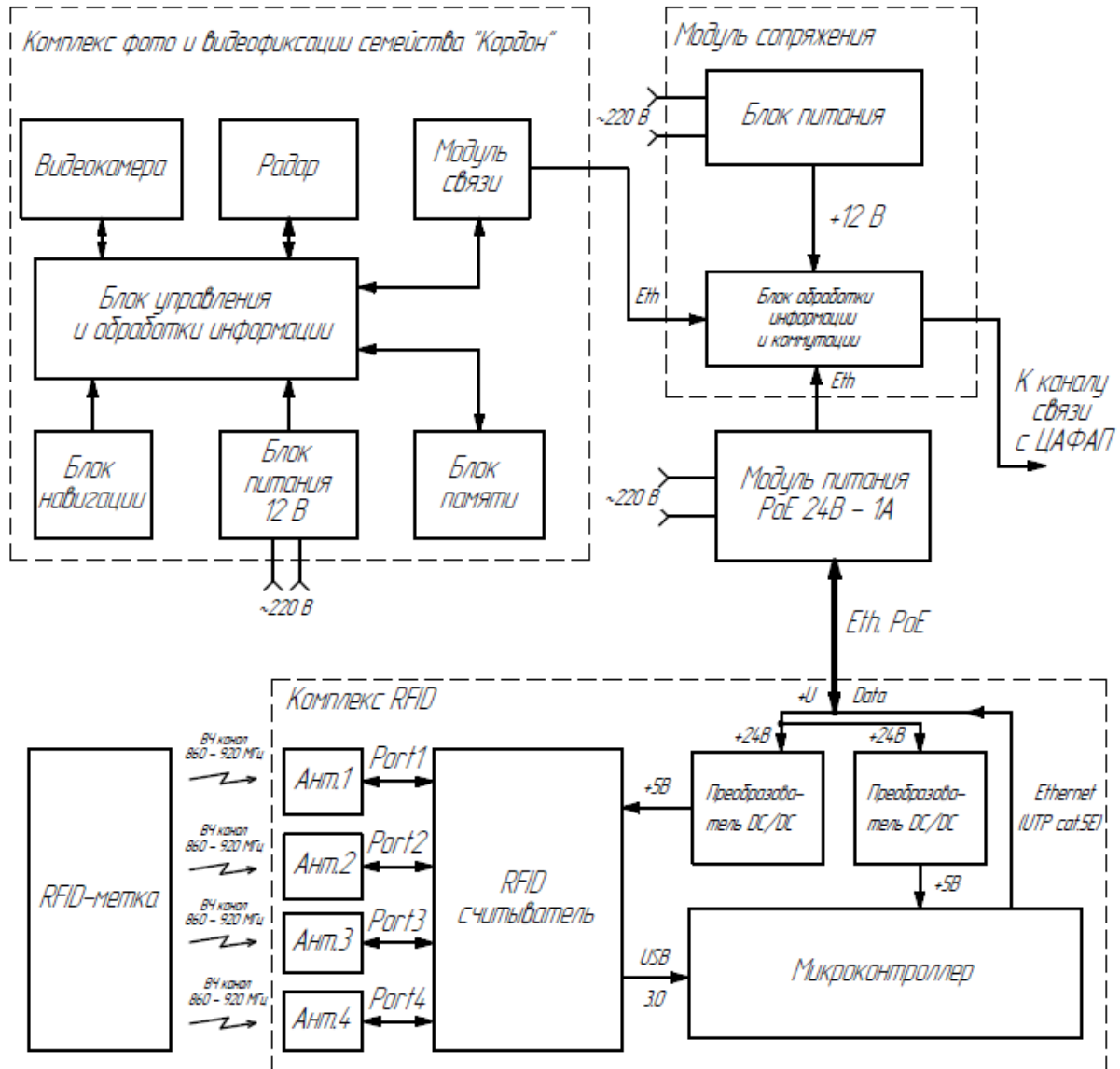


Рис. 2. Функциональная схема системы распознавания объектов с использованием радиочастотной и оптической идентификации

На рис. 3 представлена схема электрическая монтажная. Схема подключения системы распознавания объектов с использованием радиочастотной и оптической идентификации состоит из следующих компонентов: А1–А4 – антенна RFID (8 дБи, 860–870 МГц); А5 – модуль питания PoE (24 В); А6 – RFID-считыватель (ThingMagic M6e); А7 – блок питания ~220 В / 12 В; А8, А9 – DC/DC-преобразователь 24 В / 5 В; А10 – одноплатный компьютер NanoPi Neo4; А11 – комплекс фото- и видеофиксации семейства «Кордон»; А12 – модуль сопряжения.

Антенны усиления подключаются к RFID-считывателю с помощью коаксиального кабеля, сам считыватель питается от постоянного напряжения 5 В, которое он получает от преобразователя напряжения 24 В / 5 В так же, как и одноплатный компьютер получает 5 В постоянного напряжения от второго DC/DC-преобразователя. Считыватель подключен к одноплатному компьютеру по интерфейсу USB 3.0. Подключение к модулю сопряжения комплекса семейства «Кордон», а также комплекса RFID осуществляется с помощью кабелей Ethernet к соответствующим разъемам RJ-45 модуля сопряжения.

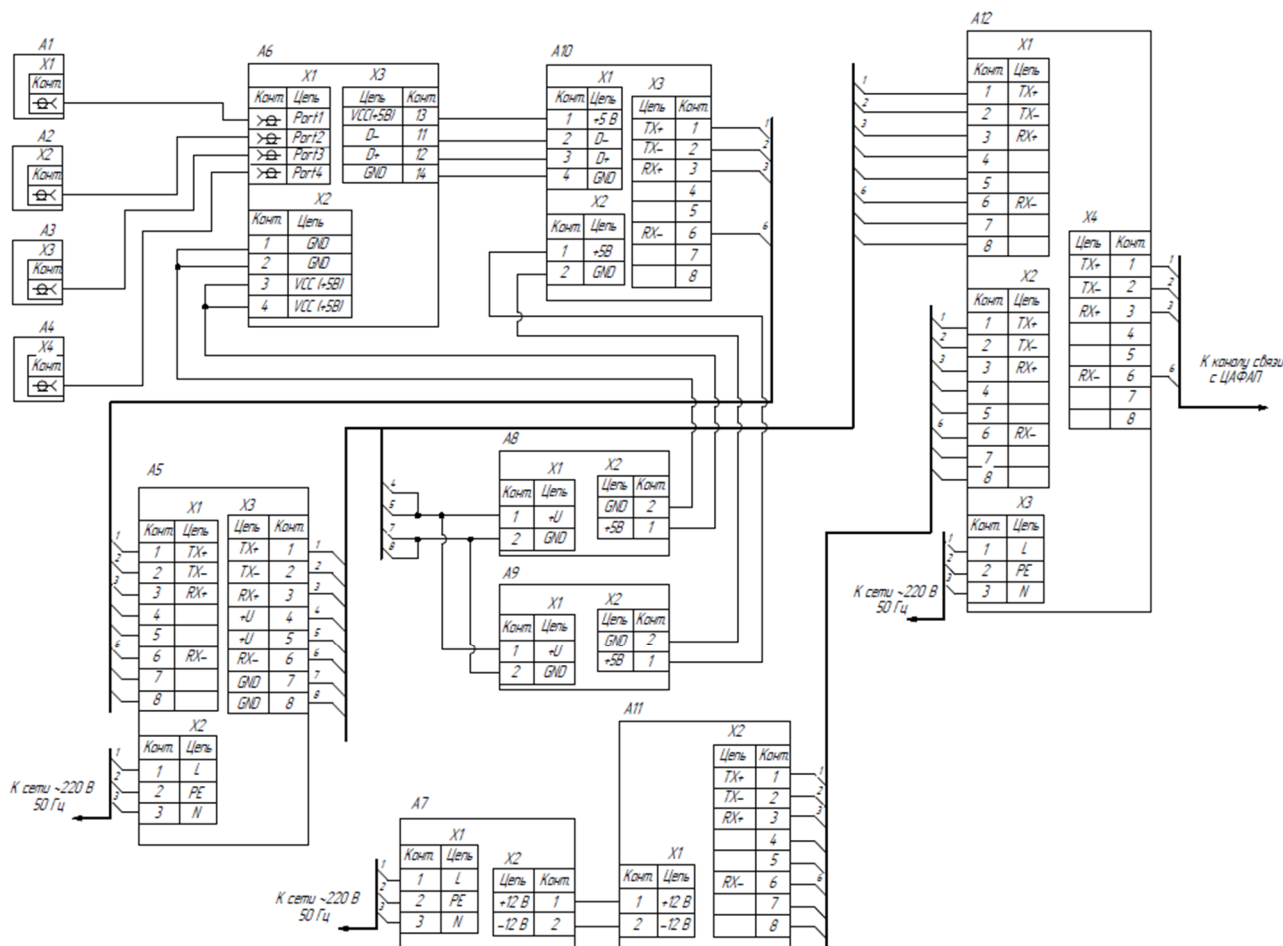


Рис. 3. Схема электрическая монтажная

В табл. 1 представлены интенсивности отказов компонентов системы, полученные на основании экспертных оценок.

Таблица 1

Интенсивности отказов компонентов системы гибридной идентификации

Элемент	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$	Количество элементов, используемых в устройстве
Комплекс фото- и видеофиксации семейства «Кордон»	0,28	1
Модуль питания PoE	0,01	2
Сетевой кабель	0,06	9
Проходной адаптер	0,05	4
AC/DC-преобразователь	0,07	1
DC/DC-преобразователь	0,03	2
Блок обработки информации и коммутации	0,15	1
Одноплатный компьютер	0,20	1
RFID-считыватель	0,24	1
Антенна RFID	0,07	4
Коаксиальный кабель	0,08	4

Выбор методики и расчет надежности системы гибридной идентификации

Обозначим через $T_i, i = \overline{1, N}$ случайные величины (с.в.), определяющие длительности безотказной работы компонентов А1–АN системы гибридной идентификации, и через $T_{\text{сис}}$ – с.в., определяющую время безотказной работы всей системы.

Расчет характеристик надежности проводится с учетом следующих допущений:

- отказ любого из компонентов приводит к выходу из строя всей системы;
- отказы компонентов являются независимыми случайными событиями.

В силу сделанных предположений очевидно, что время работы всей системы $T_{\text{сис}}$ равно минимальной из длительностей работы ее компонентов T_i :

$$T_{\text{сис}} = \min\{T_1, \dots, T_N\}.$$

Предположим, что с.в. T_i распределены по закону Гнеденко – Вейбулла с параметрами (λ_i, α) , т.е. их вероятности безотказной работы равны $e^{-\lambda_i t^\alpha}$ при $t \geq 0$. Этот закон распределения является одним из наиболее важных и популярных в теории надежности, так как он выступает в качестве предельного распределения для максимумов (и минимумов) последовательности независимых и одинаково распределенных с.в. Для расчета характеристик надежности рассматриваемой системы докажем следующее вспомогательное утверждение.

Утверждение 1. Если независимые с.в. T_i распределены по двухпараметрическому закону Гнеденко – Вейбулла с параметрами (λ_i, α) , тогда с.в. $T_{\text{сис}}$ также имеет распределение Гнеденко – Вейбулла с параметрами (λ, α) , где $\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$.

Доказательство.

$$\begin{aligned} P\{T_{\text{сис}} \leq t\} &= P\{\min T_i \leq t\} = 1 - P\{\min T_i > t\} = 1 - \prod_{1 \leq i \leq N} P\{T_i > t\} = \\ &= 1 - \prod_{1 \leq i \leq N} (1 - P\{T_i \leq t\}) = 1 - \prod_{1 \leq i \leq N} \exp\{-\lambda_i t^\alpha\} = 1 - \exp\left\{-t^\alpha \sum_{i=1}^N \lambda_i\right\} = 1 - e^{-\lambda t^\alpha}. \end{aligned}$$

Таким образом, вероятность безотказной работы системы равна

$$P_{\text{сис}}(t) = \exp\left\{-\int_0^t \sum_{i=1}^N \lambda_i(x) dx\right\} = e^{-\lambda t^\alpha}, \quad (1)$$

где $\lambda_i(t) = \alpha \lambda_i t^{\alpha-1}$ при $t \geq 0$ – опасность отказа.

Поскольку в качестве исходных данных для расчета характеристик надежности известны интенсивности отказов компонентов системы (табл. 1), то численные расчеты проводились для показательного закона надежности, т.е. при $\alpha = 1$.

В этом случае вероятность безотказной работы системы $P_{\text{сис}}(t)$, состоящей из N компонентов, вычисляется по формуле [6–8]

$$P_{\text{сис}}(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t}, \quad (2)$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го компонента; λ_i – интенсивность отказов i -го компонента, ч^{-1} ; t – время работы, ч.

Среднее время наработки на отказ системы $T_{\text{ср}}$, состоящей из N компонентов, вычисляется по формуле

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (3)$$

где λ – интенсивность отказов системы, ч^{-1} ; λ_i – интенсивность отказов i -го компонента, ч^{-1} .

Для рассматриваемой системы $N = 12$, и согласно табл. 1 интенсивность отказов системы равна

$$\lambda = (0,28 + 0,1 \cdot 2 + 0,06 \cdot 9 + 0,06 \cdot 4 + 0,07 + 0,03 \cdot 2 + 0,15 + 0,2 + 0,24 + 0,07 \cdot 4 + 0,08 \cdot 4) \cdot 10^{-5} = 2,54 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы схемы за 5000 ч равна

$$P_{\text{сис}}(t) = \exp(-2,54 \cdot 10^{-5} \cdot 5000) = 0,88.$$

Среднее время наработки системы на отказ равно

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{2,54 \cdot 10^{-5}} = 3,97 \cdot 10^4 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы системы за 5000 ч получилась меньше требуемой, а среднее время наработки на отказ практически достигает значения из технического задания. Из чего можно сделать вывод, что система нуждается в повышении надежности.

Рекомендации по повышению надежности системы

Эксперименты на контроллерах ODROID U3+, ODROID C4, NanoPi Neo3, Raspberry Pi, ODROID U, Beaglebone Black rev C показали, что все они выходят из строя при высоких нагрузках системы, ведь в таких комплексах RFID контроллеры подвергаются интенсивной работе, обрабатывая большое количество данных с RFID-считывателей. Это может привести к перегреву и износу компонентов контроллера, что в конечном итоге может привести к выходу из строя. Также стоит обратить внимание, что вышеуказанные контроллеры не имеют встроенной поддержки резервирования. Это означает, что в случае выхода из строя основного контроллера система может полностью перестать функционировать. Структурная схема надежности с учетом использования резервирования микроконтроллеров представлена на рис. 4.

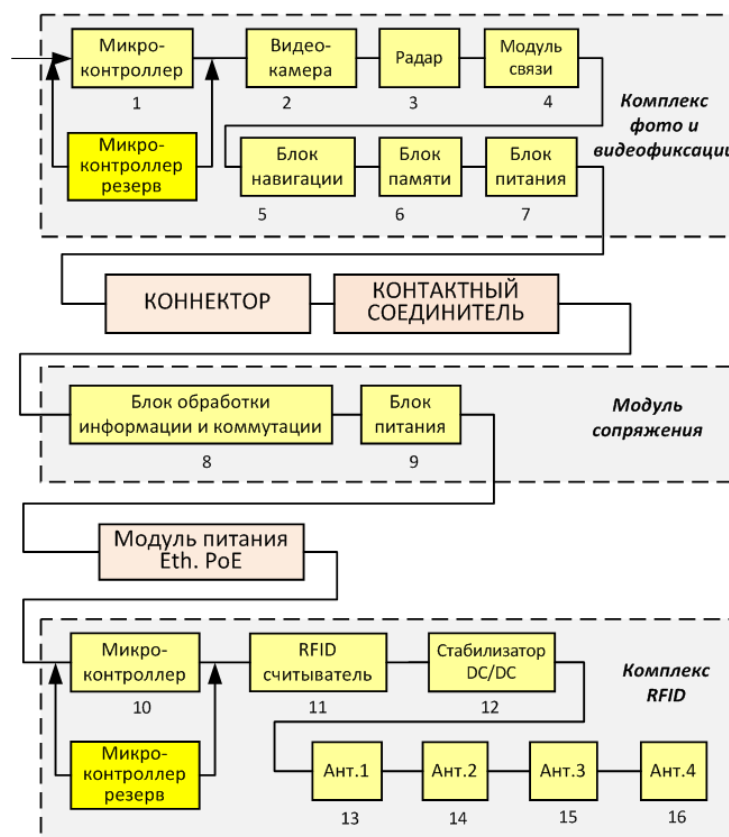


Рис. 4. Структурная схема надежности системы гибридной идентификации с резервированием микроконтроллеров

На рис. 5 представлен алгоритм работы системы распознавания объектов с использованием радиочастотной и оптической идентификации с резервированием микроконтроллеров (красной рамкой отмечены блоки, отвечающие за резервирование).

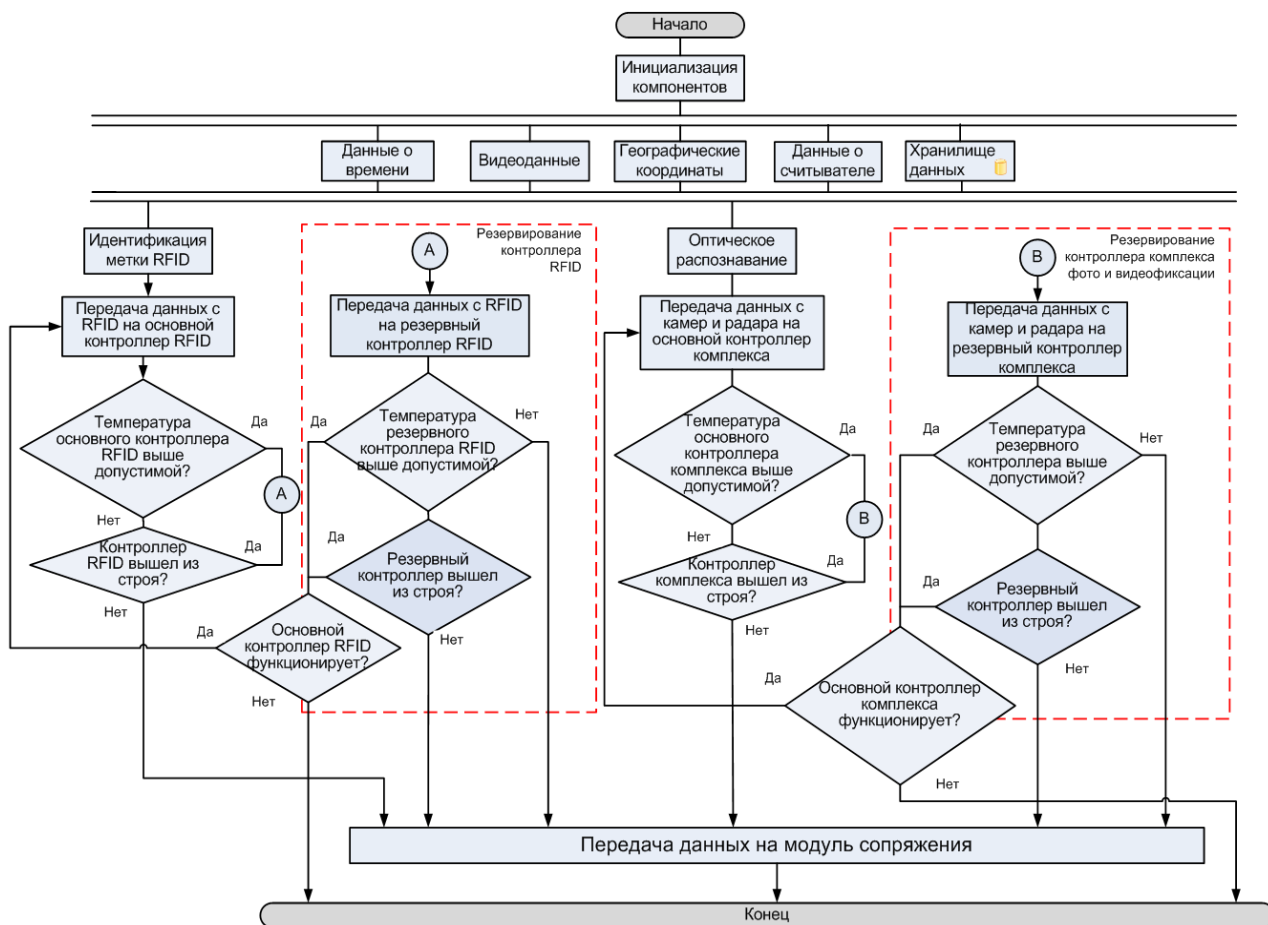


Рис. 5. Алгоритм работы системы распознавания объектов с использованием радиочастотной и оптической идентификации с резервированием микроконтроллеров

Для повышения надежности системы в комплексах RFID рекомендуется использовать резервирование современных контроллеров, таких как NanoPi Neo4. Это позволяет использовать дуэт контроллеров, которые могут автоматически вступать в работу в случае выхода из строя основного контроллера. Такой подход обеспечивает минимальные простои и повышает устойчивость системы к сбоям и выходу из строя контроллеров. Ориентировочный расчет такой системы показал, что вероятность безотказной работы с резервированием микроконтроллера составит 0,98, что является хорошим показателем надежности системы.

После инициализации компонентов параллельно начинаются циклы идентификации метки и оптического распознавания объекта, которые осуществляются непрерывно. Все полученные данные передаются в хранилище, в котором находится информация о прочитанных метках, оптически распознанных объектах, а также база розыскных транспортных средств. Передача информации о прочитанных считывателем метках поступает на основной контроллер одноплатного компьютера, подключенного к RFID-считывателю. Далее осуществляется проверка работоспособности основного контроллера. Если он не вышел из строя и его температура не превышает допустимую предельную температуру, то информация о прочитанных метках поступает на модуль сопряжения. Если же описанные выше условия выполняются, то происходит переключение на резервный контроллер RFID. В случае работоспособности резервного контроллера данные о прочитанных метках также передаются на модуль сопряжения. Если резервный контроллер вышел из строя или его температура превышает максимальную допустимую предельную, проверяется возможность переключения на основной контроллер. Если основной контроллер доступен и функционирует, происходит переключение на него, и данные о прочитанных метках вновь передаются на модуль сопряжения через основной

контроллер, если нет и оба контроллера не работоспособны, то происходит завершение распознавания до устранения причин отказа контроллеров. Использование резервирования контроллера комплекса фото- и видеофиксации, а также передача оптически распознанных объектов функционально осуществляется схожим образом.

После передачи данных с комплекса RFID и оптически распознанных объектов комплексом фото- и видеофиксации на модуль сопряжения происходит сравнение, проверка соответствия и ранжирование списков номерных знаков транспортных. Осуществляется проверка по базе данных розыскных транспортных средств, формирование изображений, журнала XML, цифровой подписи. В итоге сформированные данные направляются в центр автоматической фиксации административных правонарушений [9, 10].

Заключение

Построенная по принципу распознавания объектов с использованием радиочастотной и оптической идентификации гибридная система имеет в составе RFID-метки, RFID-считыватели, антенны, устройство фото- и видеофиксации, модуль сопряжения для передачи в центр обработки данных через телекоммуникационную сеть.

Расчет вероятности безотказной работы по выбранной методике на основе данных эксплуатационной интенсивности отказов позволил выявить, что самыми ненадежными элементами являются микроконтроллеры в составе комплексов RFID и фото- и видеофиксации.

Созданная на основе структурной и электрической монтажной схем структурная схема надежности системы гибридной идентификации, согласно выработанным рекомендациям по резервированию, реализует горячее резервирование микроконтроллеров, и вероятность ее безотказной работы составляет 0,98. Предложенный в рекомендациях энергоэффективный алгоритм обеспечивает переключение основного и резервного микроконтроллеров во времени таким образом, что не влияет на конечный результат идентификации объекта.

Список литературы

1. Larionov A. A., Ivanov R. E., Vishnevsky V. M. A stochastic model for the analysis of session and power switching effects on the performance of UHF RFID system with mobile tags // *Proceedings of the IEEE International Conference on RFID (Orlando, 2018)*. Orlando, USA, 2018. P. 1–8.
2. Larionov A. A., Ivanov R. E., Vishnevsky V. M. UHF RFID in Automatic Vehicle Identification: Analysis and Simulation // *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*. 2017. Vol. 1, iss. 1. P. 3–12.
3. Пат. RU 2760058 C1. Способ автоматического контроля дорожного движения и система, его реализующая / Барский И. В., Бондарь Д. В. № 2021118625 ; заявл. 25.06.2021 ; опубл. 22.11.2021.
4. Пат. RU 99207 U1. Автоматизированная система контроля нарушений ПДД на базе широкополосных беспроводных сетей передачи информации и RFID технологии / Вишневский В. М., Манниханов Р. Н. № 2010129975/08 ; заявл. 20.07.2010 ; опубл. 10.11.2010.
5. Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.28.002.A № 58736 Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии России на комплексы измерительные с видеофиксацией «КОРДОН-М».
6. Aminev D. A., Zhurkov A. P., Polesskiy S. N. [et al.]. Comparative analysis of reliability prediction models for a distributed radio direction finding telecommunication system // *Communications in Computer and Information Science (CCIS)*. 2016. Vol. 678. P. 194–209. doi: 10.1007/978-3-319-51917-3_18
7. Rykov V. V., Kozyrev D. V. Reliability model for hierarchical systems: Regenerative approach // *Automation and Remote Control*. 2010. Vol. 71, № 7. P. 1325–1336. doi: 10.1134/S0005117910070064
8. Rykov V. V., Kozyrev D. V. Analysis of renewable reliability systems by Markovization method // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2017. Vol. 10684. P. 210–220. doi: 10.1007/978-3-319-71504-9-19
9. Данилин М. Е., Заяра А. В., Федулов В. Д. Предложения по организации виртуальных испытаний алгоритмов распознавания объектов в системах управления мобильных робототехнических комплексов // *Надежность и качество сложных систем*. 2023. № 3. С. 100–106.
10. Кошелев Н. Д., Алхатем А., Новиков К. С. [и др.]. Управление искусственных нейронных сетей распознавания раскладов образов высокого разрешения // *Надежность и качество сложных систем*. 2022. № 2. С. 85–91.

References

1. Larionov A.A., Ivanov R.E., Vishnevsky V.M. A stochastic model for the analysis of session and power switching effects on the performance of UHF RFID system with mobile tags. *Proceedings of the IEEE International Conference on RFID (Orlando, 2018)*. Orlando, USA, 2018:1–8.
2. Larionov A.A., Ivanov R.E., Vishnevsky V.M. UHF RFID in Automatic Vehicle Identification: Analysis and Simulation. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*. 2017;1(1):3–12.
3. Patent RU 2760058 C1. *Sposob avtomaticheskogo kontrolya dorozhnogo dvizheniya i sistema, ego realizuyushchaya = A method of automatic traffic control and a system that implements it*. Barskiy I.V., Bondar' D.V. № 2021118625; appl. 25.06.2021; publ. 22.11.2021. (In Russ.)
4. Patent RU 99207 U1. *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya narusheniy PDD na baze shirokopolosnykh besprovodnykh setey peredachi informatsii i RFID tekhnologii = Automated traffic violations control system based on broadband wireless information transmission networks and RFID technology*. Vishnevskiy V.M., Manikhanov R.N. № 2010129975/08; appl. 20.07.2010; publ. 10.11.2010. (In Russ.)
5. Certificate of type approval of measuring instruments RU.C.28.002.A No. 58736 of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of Russia for measuring systems with video recording "KORDON-M". (In Russ.)
6. Aminev D.A., Zhurkov A.P., Polesskiy S.N. et al. Comparative analysis of reliability prediction models for a distributed radio direction finding telecommunication system. *Communications in Computer and Information Science (CCIS)*. 2016;678:194–209. doi: 10.1007/978-3-319-51917-3 18
7. Rykov V.V., Kozyrev D.V. Reliability model for hierarchical systems: Regenerative approach. *Automation and Remote Control*. 2010;71(7):1325–1336. doi: 10.1134/S0005117910070064
8. Rykov V.V., Kozyrev D.V. Analysis of renewable reliability systems by Markovization method. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2017;10684:210–220. doi: 10.1007/978-3-319-71504-9-19
9. Danilin M.E., Zayara A.V., Fedulov V.D. Proposals for the organization of virtual tests of object recognition algorithms in control systems of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):100–106. (In Russ.)
10. Koshelev N.D., Alkhatem A., Novikov K.S. et al. Management of artificial neural networks for recognizing high-resolution image storyboards. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):85–91. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Илья Сергеевич Галишников

студент,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)
E-mail: galishnikov.ilya@yandex.ru

Дмитрий Андреевич Аминев

кандидат технических наук, доцент кафедры
разработки программных решений
и системного программирования,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, ул. Стромынка, 20)
E-mail: aminev.d.a@ya.ru

Людмила Владимировна Бунина

старший преподаватель кафедры разработки
программных решений и системного
программирования,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, ул. Стромынка, 20)
E-mail: ludmilabunina@mail.ru

Ilya S. Galishnikov

Student,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Dmitry A. Aminev

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of development of software solutions
and system programming,
MIREA – Russian Technological University
(20 Stromynka street, Moscow, Russia)

Lyudmila V. Bunina

Senior lecturer of the sub-department
of development of software solutions
and system programming,
MIREA – Russian Technological University
(20 Stromynka street, Moscow, Russia)

Дмитрий Владимирович Козырев

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
телекоммуникационных систем,
Институт проблем управления
имени В. А. Трапезникова РАН
(Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65);
доцент кафедры теории вероятностей
и кибербезопасности,
Российский университет дружбы народов
имени Патриса Лумумбы
(Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)
E-mail: kozyrev-dv@rudn.ru

Dmitry V. Kozyrev

Candidate of physical and mathematical sciences,
senior researcher of the laboratory
of telecommunication systems,
V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems
of the Russian Academy of Sciences
(65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia);
associate professor of the sub-department
of probability theory and cybersecurity,
Patrice Lumumba Peoples' Friendship
University of Russia
(6 Miklukho-Maklaya street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 16.12.2024

Принята к публикации/Accepted 10.01.2025

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕНАЖЕРНОЙ СИСТЕМЫ НАЧАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

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

^{1, 2, 4, 5} 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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Анализируется содержание подходов и технологий разработки концептуальной модели тренажерной системы начальной подготовки операторов беспилотных авиационных систем (БАС) на основе структурной декомпозиции перечня типовых задач их профессиональной деятельности. *Материалы и методы.* Представлены результаты структурно-функциональной декомпозиции процесса тренажерной подготовки и анализ ее компонентов. *Результаты и выводы.* Сформулированы принципы определения минимального состава комплексного тренажера БАС с точки зрения методики начального обучения. Предложены общие подходы к формированию курсов начальной практической подготовки операторов БАС. Рассмотрены оптимальные формы и способы контроля уровня сформированных в процессе обучения операторских навыков. Предложена концептуальная модель тренажерной системы начальной подготовки операторов БАС.

Ключевые слова: концептуальная модель тренажерной системы, типовые задачи профессиональной деятельности, методика начального обучения операторов БАС, оптимальный состав комплексного тренажера БАС, курс практической подготовки операторов БАС, технологии контроля уровня сформированных компетенций

Для цитирования: Коваль А. А., Капустин Д. А., Короп Г. В., Онопченко С. В., Сентяй Р. Н. Концептуальная модель тренажерной системы начальной подготовки операторов беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 54–65. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-7

A CONCEPTUAL MODEL OF A SIMULATOR SYSTEM FOR THE INITIAL TRAINING OF OPERATORS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

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

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

³ LLC "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

Abstract. *Background.* The content of approaches and technologies for the development of a conceptual model of a simulator system for the initial training of operators of unmanned aircraft systems (UAS) is analyzed on the basis of a structural decomposition of a list of typical tasks of their professional activity. *Materials and methods.* The results of the structural and functional decomposition of the simulator training process and the analysis of its components are presented. *Results and conclusions.* The principles of determining the minimum composition of a complex UAS simulator from the point of view of the methodology of initial training are formulated. General approaches to the formation of initial practical training courses for UAS operators are proposed. The optimal forms and methods of controlling the level of operator skills formed during training are considered. A conceptual model of a simulator system for the initial training of UAS operators is proposed.

Keywords: conceptual model of the simulator system, typical tasks of professional activity, methodology of initial training of UAS operators, optimal composition of a complex UAS simulator, course of practical training of UAS operators, technologies for monitoring the level of formed competencies

For citation: Koval A.A., Kapustin D.A., Korop G.V., Onopchenko S.V., Sentyay R.N. A conceptual model of a simulator system for the initial training of operators of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):54–65. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-7

Введение

Стремительное развитие беспилотной авиации в нашей стране определяет необходимость координации действий, направленных на обеспечение эффективного развития данной отрасли. С этой целью Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1630-р от 21 июня 2023 г. утверждена «Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г.» (далее – Стратегия)¹.

Стратегия направлена на всестороннее обеспечение реализации всего комплекса задач, связанных с планированием и развитием беспилотной авиации в Российской Федерации, в том числе подготовку кадров для беспилотной авиации.

Темой исследования, приведенного в статье, являются вопросы практической подготовки операторов беспилотных авиационных систем (далее – БАС) в обучающих организациях. Тема исследования вытекает из необходимости решения концептуальных задач, изложенных в шестом разделе Стратегии.

В настоящее время практическая подготовка специалистов для беспилотной авиации осуществляется в рамках федерального проекта «Кадры для беспилотных авиационных систем».

В процессе подготовки операторов беспилотных авиационных систем важнейшую роль играют тренажеры. Такие тренажеры позволяют сформировать необходимые начальные навыки в дистанционном пилотировании беспилотным аппаратом, навыки их грамотной эксплуатации и технического обслуживания. Кроме того, такие тренажеры позволяют регулярно отрабатывать особые ситуации в полете, по действиям в которых оператор должен быть готовым.

Востребованность тренажеров в процессе подготовки операторов БАС непрерывно растет. Растет также количество предложений различных вариантов тренажеров БАС. Стремительно развивающееся производство тренажеров беспилотных аппаратов стимулируется растущей потребностью их использования в учебном процессе.

В настоящее время на рынке образовательных услуг представлены многочисленные варианты тренажеров: от виртуальных и интерактивных до физических, представляющих собой не тренажеры, в привычном понимании, а реальные БАС.

Стремительное развитие производства тренажеров для целей подготовки операторов БАС выявляет их недостаточную обеспеченность теоретическими исследованиями концептуального характера.

В частности, в учебном процессе образовательных организаций отсутствуют базовые научно обоснованные методики тренажерной подготовки операторов БАС, а у производителей тренажеров отсутствуют научно обоснованные методические требования к тренажерам и тренажерным системам такого вида.

Отсутствие научно обоснованных методических требований к тренажерам и тренажерным системам, научно обоснованной концептуальной модели тренажерной системы начальной подготовки операторов БАС послужили причиной и основанием для дальнейших исследований в этой области.

Целью исследования, приведенного ниже, является разработка концептуальной модели тренажерной системы подготовки операторов беспилотных авиационных систем.

Объектом исследования является информационная система комплексного тренажера по отработке начальных навыков операторов беспилотных авиационных систем.

Предметом исследования является концептуальная модель тренажерной системы начальной подготовки операторов беспилотных авиационных систем.

Профессиональные компетенции операторов БАС

Концептуальную модель тренажерной системы подготовки операторов БАС можно построить исключительно на основе системного анализа полного перечня профессиональных компетенций. Только на основе такого анализа можно получить перечень умений и навыков, которыми должен обладать оператор БАС.

¹ Об утверждении Стратегии развития беспилотной авиации РФ на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г. и плана мероприятий по ее реализации : распоряжение Правительства РФ № 1630-р от 21 июня 2023 г. // Юридическая информационная система «Легалакт – законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации». URL: <https://legalacts.ru>

В свою очередь перечень необходимых компетенций операторов БАС можно получить на основе структурной декомпозиции перечня типовых задач их профессиональной деятельности [1].

Опыт применения БАС в различных сферах позволяет выделить восемь основных направлений применения таких систем. Стратегия развития беспилотной авиации России определяет эти направления как: «сбор и передача данных, дистанционный мониторинг», «проведение авиационной разведки и обеспечение охраны территории и объектов», «внесение веществ», «аэрологистика», «работы по обеспечению связи», «образовательная и спортивная деятельность», «визуальные инсталляции», «внешние работы»¹.

Каждое направление применения БАС предполагает выполнение большого количества типов задач профессиональной деятельности. Таким образом, концептуальная модель тренажерной системы подготовки операторов БАС должна предполагать возможность отработки базовых навыков оператора БАС по каждому из восьми направлений их использования, с учетом специфики выполнения типовых задач.

Профессиональные компетенции, формирование которых предполагается с использованием тренажерной системы, приводятся в образовательных стандартах. В настоящее время подготовка операторов БАС в России регулируется федеральным образовательным стандартом среднего профессионального образования по специальности 25.02.08 «Эксплуатация беспилотных авиационных систем», зарегистрированного в Минюсте России 13.02.2023 за № 72345².

Анализ содержания существующих программ практической подготовки операторов БАС, методики практического обучения, технических средств, применяемых для целей обучения в обучающих организациях, показывает, что, несмотря на наличие федерального государственного образовательного стандарта (ФГОС), процесс обучения выявляет признаки хаотичности и системной неупорядоченности.

Признавая безусловную пользу от своеобразной «разношерстности» применяемых методик и стремительного генерирования образовательными организациями новых идей и подходов к организации процесса подготовки операторов БАС, отмечаем также необходимость централизованного регулирования этого процесса.

Такая необходимость обусловлена, прежде всего, строгим регулированием практического использования БАС целым рядом нормативных документов, включая международные стандарты в области беспилотной авиации, утверждаемые Советом Международной организации гражданской авиации.

Кроме того, федеральным законом «Об образовании в Российской Федерации» № 273-ФЗ от 29.12.2012 предусматривается необходимость стандартизации основных компонентов образовательного процесса. В частности, законом предусматривается, что «... Федеральные государственные образовательные стандарты и федеральные государственные требования обеспечивают ... единство образовательного пространства Российской Федерации»³.

Реализация концепции единства образовательного пространства предусматривает разработку и внедрение в учебный процесс соответствующих образовательных стандартов, необходимой инфраструктуры, тренажерных систем, базовых методик практического обучения операторов, технических средств обучения и сопровождения, учебных материалов.

Предполагается, что реализация такого подхода позволит создать регулируемую образовательную среду обучающих организаций, а также обеспечить планирование и обеспечение образовательного процесса на государственном уровне. А реализация концепции единого образовательного пространства может быть обеспечена системой нормативных актов, важнейшим из которых является федеральный образовательный стандарт (ФГОС).

Однако на сегодня ни наличие образовательного стандарта, ни других нормативных документов, регулирующих и нормирующих процесс, не обеспечивают на практике целей концепции.

¹ Об утверждении Стратегии развития беспилотной авиации РФ на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г. и плана мероприятий по ее реализации : распоряжение Правительства РФ № 1630-р от 21 июня 2023 г. // Юридическая информационная система «Легалакт – законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации». URL: <https://legalacts.ru>

² Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по специальности 25.02.08 Эксплуатация беспилотных авиационных систем : приказ Минпросвещения России № 2 от 09.01.2023. URL: <https://kbadk.ru>

³ Об образовании в Российской Федерации : федер. закон № 273-ФЗ от 29.12.2012.

Подготовка операторов БАС предполагает проведение тренажерной подготовки с целью формирования начальных операторских навыков. К сожалению, действующий образовательный стандарт не предусматривает ее проведение. Более того, в стандарте нет прямого указания на степень овладения элементами техники дистанционного пилотирования беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА).

Детальный анализ содержания профессиональных компетенций ФГОС 25.02.08 «Эксплуатация беспилотных авиационных систем» выявляет ряд существенных недостатков, оказывающих системное влияние на процесс подготовки операторов БАС.

В частности, ФГОС не содержит блока профессиональных компетенций оператора дистанционного пилотирования беспилотных воздушных судов самолетного типа вертикального (укороченного) взлета и посадки, беспилотных воздушных судов мультироторного типа¹.

Требования к специальной профессиональной подготовке оператора по эксплуатации беспилотных авиационных систем самолетного типа ФГОС определяет всего шестью профессиональными компетенциями, что на наш взгляд недостаточно. Точно в таком же объеме определены требования к эксплуатации беспилотных авиационных систем вертолетного и смешанного типа².

При этом содержание профессиональных компетенций ФГОС охватывает смежные процедуры профессиональной деятельности оператора БАС, а потому информационно перегружено. Содержательное толкование (интерпретация) таких компетенций в процессе составления основных профессиональных образовательных программ возлагается на образовательные организации. Это порождает условия произвольного толкования смысла компетенций и, как следствие, значительной разницы в содержании учебных программ в разных образовательных организациях.

В стандарте также отсутствуют индикаторы уровня формирования компетенций. Формирование критериев оценки, а также индикаторов уровня их подготовки также возлагается на образовательные организации.

Еще более формально и в самом обобщенном виде в стандарте представлены требования к материально-техническому и учебно-методическому обеспечению процесса реализации образовательных программ.

По мнению авторов, такой уровень нормативного регулирования процесса подготовки специалистов в области эксплуатации беспилотных авиационных систем недопустим.

Таким образом, сложившаяся к моменту настоящего исследования система подготовки операторов БАС в образовательных организациях среднего и высшего профессионального образования обладает рядом системных структурных недостатков. В частности, сложившаяся система подготовки специалистов в этой области, а также нормативное регулирование этого процесса со стороны ФГОС не отвечают уровню современных требований к специалисту по эксплуатации беспилотных авиационных систем [1].

Следует отметить, что количество беспилотных авиационных систем, а также области их применения стремительно нарастают. Кроме того, в воздушном пространстве кроме БПЛА находятся пилотируемые летательные аппараты, в том числе пассажирские.

Указанные выше обстоятельства, предъявляют к специалистам по их эксплуатации дополнительные требования с точки зрения безопасности. Все это должно найти однозначное отражение в образовательных стандартах и в процессе практической подготовки операторов.

К решению концептуальных вопросов построения тренажерных систем для подготовки летного состава обращаются многие авторы. В частности, в своем исследовании [2] Е. М. Шеповалов приводит технологическую схему анализа структурно-функционального облика авиационных многофункциональных тренажеров. Процедура анализа, в представлении автора, должна начинаться с системного анализа (структурной декомпозиции) множества учебных задач, подлежащих отработке на тренажере [2, с. 59–61].

По мнению авторов, процедура такого анализа должна начинаться с системного анализа (структурной декомпозиции) полного перечня типовых задач профессиональной деятельности и трудовых функций, приведенных в профессиональных стандартах будущего специалиста, в нашем случае оператора беспилотных авиационных систем (БАС).

¹ Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по специальности 25.02.08 Эксплуатация беспилотных авиационных систем : приказ Минпросвещения России № 2 от 09.01.2023. URL: <https://kbadk.ru>

² Там же.

В практике летного обучения в России и за рубежом сложился подход, заключающийся в формулировании системы таких задач в виде курсов практической учебно-летной подготовки. Такие курсы представляют собой сборники упражнений (комплексных заданий) практической учебно-летной (в том числе тренажерной) подготовки.

Курс практической тренажерной подготовки операторов БАС с использованием тренажерного комплекса

Разработку концептуальной модели тренажерной системы логично начать с разработки курса учебно-летной подготовки оператора БАС. Это обусловлено тем, что тренажерная система должна обеспечивать возможность отработки навыков по упражнениям этого курса. В процессе исследования такой курс практической тренажерной подготовки был разработан.

При разработке курса практической тренажерной подготовки операторов БАС с использованием тренажерного комплекса исходили из следующих, разработанных авторами в процессе анализа, концептуальных положений и принципов:

1. Курс практической тренажерной подготовки операторов БАС должен быть направлен на формирование полного перечня профессиональных компетенций, предусмотренных образовательным и профессиональным стандартами.

2. Основанием для формулирования компетенций специалиста по эксплуатации беспилотных авиационных систем должен быть полный перечень комплексных типовых задач, разработанный на основе системного анализа и структурной декомпозиции обобщенного объекта профессиональной деятельности оператора БАС, с учетом требований соответствующих профессиональных стандартов.

3. Система компетенций образовательного стандарта должна быть сформирована на их прямом соответствии содержанию детального перечня типовых профессиональных задач, к решению которых готовится оператор БАС.

4. Перечень типовых задач должен быть полностью согласован по содержанию с компетенциями, а компетенции, в свою очередь, должны быть согласованы с перечнем необходимых теоретических знаний, умений (навыков) и условий профессиональной деятельности.

5. Перечень необходимых теоретических знаний и операторских умений должен содержать указание необходимого уровня их сформированности.

6. Информационный объем каждой типовой задачи и соответствующей ей компетенции должен обеспечивать возможность их формирования в рамках одного упражнения с заданным (конечным) числом его повторения.

7. Контроль уровня сформированности каждой компетенции оператора БАС должен обеспечиваться путем выполнения контрольного квалификационного полетного задания на тренажере.

8. Количество видов комплексных квалификационных полетных заданий, выполняемых на тренажере за весь период обучения, должно соответствовать количеству формируемых компетенций образовательного стандарта.

На основании сформулированных авторами принципов в процессе исследования был разработан курс учебно-летной подготовки операторов БАС.

Курс учебно-летной подготовки операторов БАС содержит восемь тематических разделов, в которых сгруппированы 52 комплексных упражнения.

Тематические разделы курса охватывают наиболее востребованные направления использования беспилотных авиационных систем и направлены на формирование:

- начальных навыков в технике пилотирования беспилотного летательного аппарата мультироторного типа;
- сложных комбинированных навыков в технике пилотирования и визуальной навигации беспилотного летательного аппарата мультироторного типа;
- сложных комбинированных навыков в технике пилотирования и приборной навигации БПЛА при выполнении полетов по маршруту в сложных метеорологических условиях (по приборам вне визуальной видимости земли);
- сложных комбинированных навыков в технике пилотирования и визуальной навигации БПЛА с выполнением специальных задач по дистанционному мониторингу внешней среды, сбору и передаче данных;
- сложных комбинированных операторских навыков в технике пилотирования и визуальной навигации БПЛА при выполнении специальных задач по транспортировке грузов;

- сложных комбинированных навыков в технике пилотирования и визуальной навигации БПЛА при выполнении специальных задач ситуационного мониторинга чрезвычайных ситуаций;
- сложных комбинированных навыков в технике пилотирования и визуальной навигации БПЛА в процессе выполнения полетов по маршруту в условиях радиоэлектронного противодействия;
- сложных комбинированных навыков в технике пилотирования и визуальной навигации БПЛА при выполнении специальных тактических задач.

Каждое упражнение курса направлено на отработку операторских навыков в технике пилотирования, навигации, а также навыков применения специального оборудования БПЛА в процессе выполнения полетного задания.

Курс содержит организационно-методические указания по выполнению каждого раздела. В свою очередь каждое упражнение курса содержит полетное задание, условия его выполнения, отрабатываемые элементы, методику выполнения элементов задания, порядок их оценки.

Концепция и принципы построения тренажерной системы оператора БАС

Анализ практики использования авиационных тренажерных систем в процессе подготовки летного состава в авиационных вузах, содержания компетенций образовательных стандартов по подготовке операторов БАС, а также технологий использования БПЛА в различных сферах их применения дают основания для формулирования базовых принципов разработки таких систем. Сформулируем эти принципы и приведем их обоснование.

Принцип 1. Источником концептуальных, функциональных, методических, технических и эргономических требований к тренажеру БАС должен быть полный перечень типовых профессиональных задач и соответствующих им компетенций (знаний, умений и навыков), формирование которых предусматривается с использованием тренажерной системы.

Обоснование. Формулируя этот принцип, авторы исходили из того, что невозможно построить тренажер, не имея представления о компетенциях (знаниях, умениях и навыках) для формирования, которых он предназначен. Только детальный анализ компетенций позволяет сформировать техническое задание на разработку тренажера, с точным указанием его обучающих свойств.

Принцип 2. Обучающие возможности тренажера БАС должны обеспечивать формирование полного перечня компетенций, приведенных в образовательном стандарте.

Обоснование. Реализация этого принципа обеспечивает максимальную степень использования тренажера в процессе формирования начальных навыков операторов БАС по всем упражнениям курса учебно-летной подготовки. В противном случае начальные навыки оператора возможно формировать только в реальных условиях, что далеко не всегда целесообразно как с экономической точки зрения, так и с точки зрения безопасности.

Принцип 3. Обучающие возможности тренажера БАС должны обеспечивать моделирование условий выполнения полетного задания каждого упражнения курса.

Обоснование. Это один из важнейших принципов. Его реализация обеспечивает максимальную степень соответствия реальных условий работы оператора БАС и моделируемых тренажерной системой.

Таким образом, тренажерная система подготовки операторов БАС должна содержать подсистему моделирования условий выполнения полетного задания каждого упражнения курса.

Принцип 4. Информационная модель тренажера БАС должна обеспечивать параллельное физическое и виртуальное моделирование обучающего пространства.

Обоснование. Наибольший обучающий эффект можно достичь в случае использования реального БПЛА в реальном физическом пространстве. В случае с БПЛА мультироторного типа сделать это не сложно для значительной части упражнений курса подготовки. Например, для этой цели можно использовать малый полигон, оборудованный в закрытом помещении достаточных размеров.

В то же время выполнение упражнений, связанных с полетами на большие расстояния с целью формирования сложных комбинированных навыков в технике пилотирования, визуальной и приборной навигации БПЛА, навыков использования полезной нагрузки при решении специальных задач по дистанционному мониторингу внешней среды, сбору и передаче данных, транспортировке грузов, при выполнении специальных задач ситуационного мониторинга чрезвычайных ситуаций и других задач, где отсутствует визуальный контакт с БПЛА, возникает необходимость виртуального моделирования внешней среды (обучающего пространства).

Такая необходимость обусловлена повышением интенсивности использования воздушного пространства беспилотными воздушными судами, в связи с чем растет вероятность опасных сближений БПЛА и пилотируемых летательных аппаратов.

Кроме того, моделирование обучающего пространства позволяет воссоздавать практически любые метеорологические условия, тактическую и ситуационную обстановку, моделировать отказы систем БПЛА, оборудования полезной нагрузки, практически любые нештатные ситуации.

Другими словами, цифровое моделирование позволяет воссоздавать для каждого упражнения курса учебно-летной подготовки необходимую модель обучающего пространства, максимально соответствующую целям и задачам каждого упражнения.

Таким образом, логика подсказывает необходимость сочетания двух способов моделирования обучающего пространства: физического и виртуального.

Принцип 5. Тренажерная система подготовки операторов БАС должна сочетать возможность непосредственного физического управления БПЛА в воздушном пространстве над полигоном и физического (с использованием наземной станции) управления полетом виртуальной модели БПЛА в виртуальном пространстве.

Обоснование. Рабочим местом оператора БАС является наземная станция управления полетом БПЛА и его полезной нагрузкой. Поэтому с целью формирования адекватных операторских навыков, независимо от способа моделирования обучающего пространства, вид рабочего места обучаемого не должен изменяться.

Принцип 6. Информационная модель тренажера БАС должна обеспечивать моделирование необходимых метеорологических условий выполнения упражнений курса учебно-летной подготовки.

Таким образом тренажерная система подготовки операторов БАС должна содержать подсистему моделирования метеорологических условий выполнения полетных заданий.

Обоснование. Необходимость реализации этого принципа очевидна. Метеорологические условия как один из важнейших факторов внешней среды должен воспроизводиться (моделироваться) с максимальной точностью.

Принцип 7. Информационная модель тренажера БАС должна обеспечивать моделирование необходимой тактической (ситуационной) обстановки в соответствии с содержанием упражнений курса учебно-летной подготовки.

Обоснование. Необходимость реализации этого принципа также очевидна. Тактическая (ситуационная) обстановка как один из важнейших факторов внешней среды в которой выполняется учебный полет должен воспроизводиться (моделироваться) в соответствии с заданием на полет.

Таким образом, тренажерная система подготовки операторов БАС должна содержать подсистему моделирования тактической (ситуационной) обстановки в зоне выполнения полетных заданий.

Принцип 8. Информационная модель тренажера БАС должна обеспечивать непрерывное измерение необходимых параметров обучающего пространства, текущие координаты и параметры динамики БПЛА, координаты объектов и целей, результаты выполнения полетного задания¹.

Обоснование. Процесс практического обучения операторов БАС, а также безопасность этого процесса невозможно организовать без измерений необходимых параметров обучающего пространства. Невозможно также оценить эффективность процесса формирования навыков без измерения координат и параметров динамики управляемых объектов, без сравнения этих параметров с заданными.

Таким образом, тренажерная система подготовки операторов БАС должна содержать подсистему измерения параметров обучающего пространства, измерения, анализа и оценки формируемых навыков.

Сформулированные выше принципы стали методологической основой для построения концептуальной модели тренажерной системы оператора БАС.

Кроме того, эти принципы составляют базовый перечень необходимых методических и обучающих свойств тренажерной системы операторов БАС.

Концептуальная модель тренажерной системы подготовки операторов БАС

В соответствии с принятым авторами принципом сочетания двух способов моделирования обучающего пространства – физического и виртуального – концептуальная модель тренажерной системы представлена на рис. 1.

¹ ГОСТ Р 57259–2016. Национальный стандарт Российской Федерации Тренажеры авиационные. Термины и определения. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293750/4293750301.pdf>

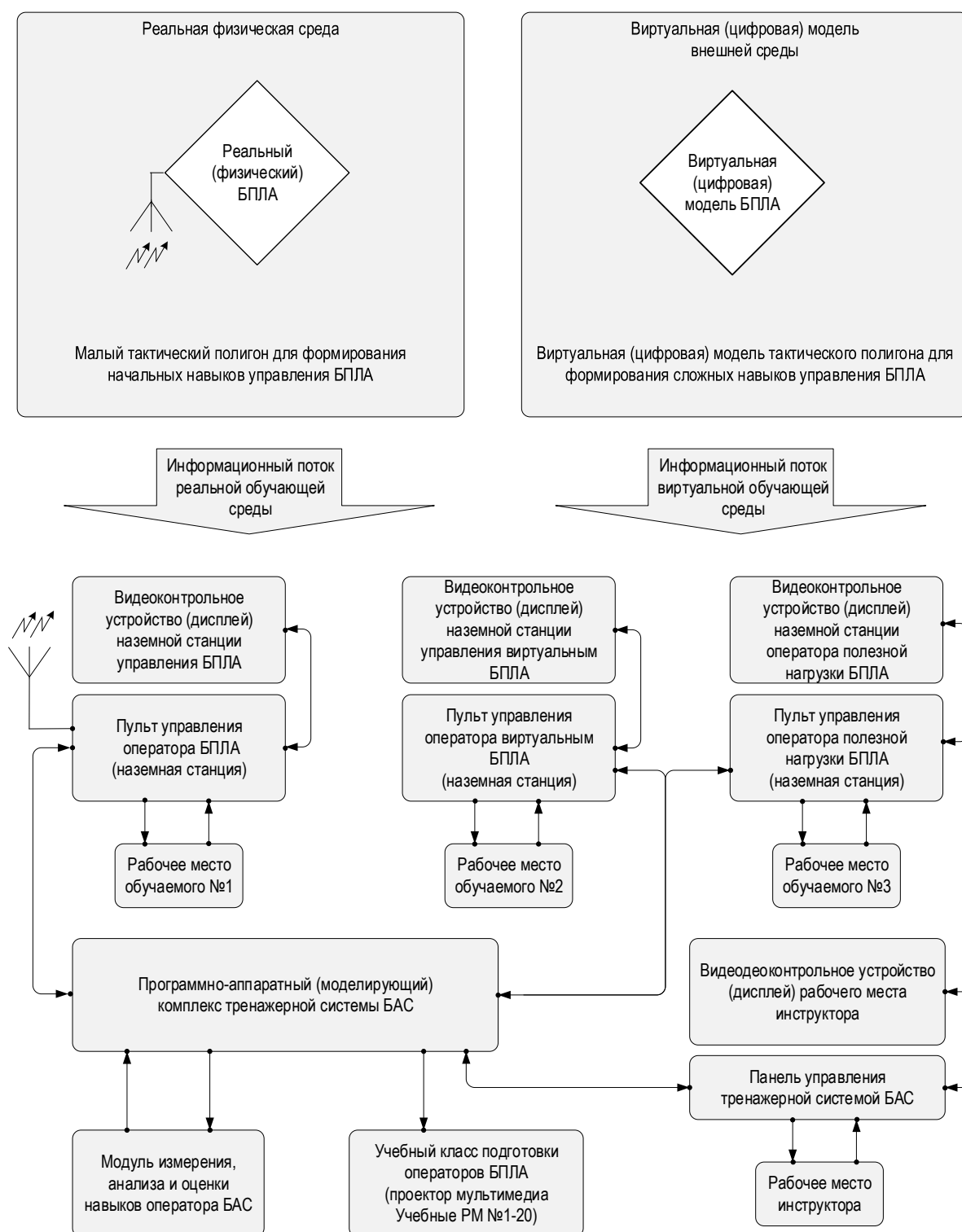


Рис. 1. Концептуальная модель тренажерной системы БАС

Центральным звеном модели является программно-аппаратный моделирующий комплекс тренажерной системы БАС. Этот комплекс позволяет осуществлять:

- автоматическое построение локальной системы координат пространства событий в зоне визуального пилотирования БПЛА;
- автоматическое измерение локальных пространственно-временных координат БПЛА в зоне визуального пилотирования;
- автоматическое измерение пространственно-временных координат объектов, целей и событий в зоне визуального пилотирования БПЛА;

- генерирование виртуальной (цифровой) модели тактического полигона для формирования сложных навыков управления БПЛА и его полезной нагрузки (за пределами малого тактического полигона);
- генерирование виртуальной (цифровой) модели БПЛА с заданными весогабаритными и аэродинамическими характеристиками;
- генерирование виртуальной (цифровой) модели рельефа местности заданного района;
- генерирование виртуальной (цифровой) модели внешней среды, естественных и искусственных объектов пролетаемой местности за пределами малого тактического полигона;
- моделирование пространственного распределения полей измеряемых параметров для обеспечения учебных полетов связанных с выполнением мониторинга параметров внешней среды;
- генерирование метеорологической и ситуационной обстановки, отказов систем БПЛА, особых ситуаций (случаев) в полете.

Концептуальная модель рабочего места обучаемого (концепция информационной модели обучающей среды)

Тренажерная система содержит в своем составе три рабочих места активного обучения и 20 рабочих мест пассивного обучения.

Рабочее место обучаемого № 1 (активное) позволяет выполнять учебные полеты по управлению реальным (физическим) БПЛА в зоне малого тактического полигона (в зоне визуальной видимости БПЛА). Размер зоны малого тактического полигона предполагает его размещение в закрытом помещении соответствующих размеров.

Рабочее место обучаемого № 1 представляет собой реальную наземную станцию того БПЛА, на который производится обучение. Такой подход оправдан, так как позволяет избежать формирования ложных навыков и одновременно наиболее продуктивно формировать необходимые операторские навыки по управлению конкретным типом БПЛА.

Рабочее место обучаемого № 2 (активное) позволяет выполнять учебные полеты по управлению виртуальной (цифровой моделью) БПЛА в зоне виртуальной (цифровой) модели тактического полигона. Это рабочее место предназначено для формирования сложных навыков визуального и приборного управления полетом БПЛА с использованием его полезной нагрузки (за пределами малого тактического полигона).

Рабочее место обучаемого № 3 (активное) позволяет выполнять учебные полеты по управлению виртуальной (цифровой моделью) полезной нагрузки БПЛА в зоне виртуальной (цифровой) модели тактического полигона. Это рабочее место предназначено для формирования сложных навыков операторов управления полезной нагрузкой БПЛА (за пределами малого тактического полигона).

Рабочее место обучаемого № 1 может использоваться независимо от других учебных мест. Рабочие места обучаемых № 2 и 3 могут использоваться как совместно, при выполнении полетов в составе экипажа, так и раздельно.

В процессе выполнения учебных полетов с рабочих мест № 2 и 3 генерируемый программно-аппаратным комплексом тренажерной системы видеопоток передается по сети на видеопроектор и на мониторы в учебный класс предварительной подготовки операторов БПЛА.

Таким образом параллельно с тренировкой операторов на рабочих местах № 1–3 другая группа обучаемых в учебном классе в количестве 15–20 человек самостоятельно или под руководством инструктора сможет выполнять упражнения, связанные с навигационными расчетами, визуальной ориентировкой, поиском ориентиров (целей) по заданным распознавательным признакам, отработкой навыков считывания показаний навигационно-пилотажных приборов, другими задачами. Все рабочие места могут использоваться как раздельно, так и совместно.

Концептуальная модель рабочего места инструктора

Рабочее место инструктора представляет собой видеодисплейный терминал на базе персонального компьютера. Такое концептуальное решение позволяет осуществлять контроль всех удаленных учебных мест тренажерной системы с одного рабочего места инструктора.

Для целей контроля района малого полигона, рабочих мест обучаемых № 1–3, а также класса предварительной подготовки операторов БПЛА предусматривается использование системы видеонаблюдения. Видеопоток с камер передается на рабочее место инструктора.

С рабочего места инструктора может осуществляться централизованное включение и выключение оборудования рабочих мест тренажерной системы, ввод начальных условий и исходных данных по упражнениям курса учебно-лётной подготовки, контроль действий обучаемых на всех рабочих местах, задание сценариев тактической и ситуационной обстановки, задание параметров метеорологической обстановки, обеспечение связи с операторами и коррекция их действий.

Концептуальная модель модуля квалиметрии навыков обучаемых

Принципиальным решением концептуальной модели тренажерной системы является возможность непрерывного измерения координат, времени и параметров движения БПЛА, координат и времени событий, связанных с процессом выполнения учебных упражнений, всех параметров работы тренажерной системы.

Для реализации этих целей в тренажерной системе моделируется локальная система пространственных координат, позволяющая реализовать операционную среду реального времени.

Массивы данных координат, времени и параметров движения БПЛА, а также другие данные, в том числе видеоданные являются исходным статистическим материалом для оценки результатов обучения на тренажере.

Оценка отрабатываемых учебных элементов, связанных с точностью позиционирования БПЛА в пространстве, точностью выдерживания заданного маршрута полета, точностью сброса грузов по заданным координатам производится квалиметрической системой тренажера автоматически.

Каждый обучаемый по результатам выполнения учебных упражнений получает лист контроля с оценкой элементов полетного задания в электронном или печатном виде.

Концептуальная модель технического обеспечения и сопровождения тренажерной системы в обучающей организации

В процессе разработки концептуальной модели тренажерной системы изучался вопрос необходимости и достаточности технического обеспечения и сопровождения тренажерной системы в обучающей организации.

Анализ процесса эксплуатации и обслуживания беспилотных авиационных систем в обучающих и эксплуатирующих организациях показывает необходимость непрерывного квалифицированного информационного обеспечения, сопровождения и технического обслуживания БПЛА, наземных станций, сетевого оборудования и т. п.

Обобщая опыт эксплуатирующих организаций считаем целесообразным в обучающих организациях, эксплуатирующих тренажерные комплексы БАС иметь мастерскую-лабораторию по ремонту, восстановлению и техническому обслуживанию всего комплекса учебного оборудования БАС. Состав оборудования такой мастерской может варьироваться, но анализ практики эксплуатации БАС приводит к выводу, что основными элементами такой мастерской должны быть: принтер для 3D-печати пластиковых элементов конструкции БПЛА, паяльная станция, набор запасных частей и расходных материалов, готовые пакеты программного обеспечения, техническая документация.

Заключение

Разработка научно обоснованной концептуальной модели тренажерной системы начальной подготовки операторов БАС актуальна, так как является методологической основой развития важной отрасли производства таких систем для целей подготовки операторов БАС.

Источником концептуальных, функциональных, методических, технических и эргономических требований к тренажеру БАС должен быть полный перечень комплексных типовых задач профессиональной деятельности, разработанный на основе системного анализа и структурной декомпозиции обобщенного объекта профессиональной деятельности оператора БАС с учетом требований соответствующих профессиональных стандартов.

Обучающие возможности тренажера БАС должны обеспечивать формирование полного перечня компетенций, приведенных в образовательном стандарте.

Информационная модель тренажера БАС должна обеспечивать параллельное физическое и виртуальное моделирование обучающего пространства. Это обусловлено невозможностью воссоздавать необходимые условия по всем упражнениям в процессе обучения на тренажере. В свою очередь цифровое моделирование позволяет воссоздавать для каждого упражнения курса учебно-лётной

подготовки необходимую модель обучающего пространства, максимально соответствующую целям и задачам каждого упражнения.

Независимо от способа моделирования обучающего пространства, вид рабочего места обучаемого не должен изменяться. Таким образом тренажерная система подготовки операторов БАС должна сочетать возможность непосредственного физического управления БПЛА в воздушном пространстве над полигоном и физического (с использованием наземной станции) управления полетом виртуальной модели БПЛА в виртуальном пространстве.

Информационная модель тренажера БАС должна обеспечивать моделирование необходимой метеорологической, тактической, ситуационной обстановки в соответствии с содержанием упражнений курса учебно-лётной подготовки.

Информационная модель тренажера БАС должна обеспечивать непрерывное измерение необходимых параметров обучающего пространства, текущие координаты и параметры динамики БПЛА, координаты объектов и целей, результаты выполнения полётного задания [3, 4].

Список литературы

1. Онопченко С. В., Коваль А. А. Оптимальный состав системы компетенций в образовательных стандартах высшего образования // Педагогическое образование и наука. 2021. № 1. С. 109–121.
2. Шеповалов Е. М. Технологическая схема структурно-функционального анализа авиационных multifunctional тренажеров // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2020. № 4 (56). С. 53–63.
3. Мельничук А. И. Большие перспективы малых беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 88–94.
4. Горячев Н. В., Избасов А. Г., Мельничук А. И. [и др.]. К проблеме синтеза системы противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 64–71.

References

1. Onopchenko S.V., Koval' A.A. Optimal composition of the competence system in educational standards of higher education. *Pedagogicheskoe obrazovanie i nauka = Teacher education and science*. 2021;(1):109–121. (In Russ.)
2. Shepovalov E.M. Technological scheme of structural and functional analysis of aviation multifunctional simulators. *Informatsionno-ekonomicheskie aspekty standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya = Information and economic aspects of standardization and technical regulation*. 2020;(4):53–63. (In Russ.)
3. Mel'nichuk A.I. Great prospects for small unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):88–94. (In Russ.)
4. Goryachev N.V., Izbasov A.G., Mel'nichuk A.I. et al. On the problem of synthesizing a system for countering small-sized unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):64–71. (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

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

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

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)

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)

Roman N. Sentyay

Senior lecturer 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 21.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 18.12.2024

Принята к публикации / Accepted 12.01.2025

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО ЗАМЫКАТЕЛЯ

В. Н. Китаев¹, Р. Л. Афанасьев², М. В. Петров³

^{1, 2, 3} Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия
^{1, 2, 3} kb2@vniitf.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Инерционный замыкатель предназначен для использования в системах коммутации электрических цепей задействования систем безопасности подвижных объектов (автомобилей). *Материалы и методы.* Инерционный замыкатель содержит корпус с выполненным из диэлектрического материала основанием, размещенное в корпусе инерционное тело, выполненное в виде тела вращения и поджатое пружиной к верхней части корпуса с возможностью перемещения и/или наклона до взаимодействия торцевой поверхности с электрическими контактными поверхностями, установленными на основании. Инерционное тело выполнено с фланцем, которым оно поджато пружиной до взаимодействия с внутренней и торцевой поверхностями верхней части корпуса. При этом устройство дополнено контактом, установленным в исходном положении с зазорами относительно торцевой поверхности инерционного тела и поверхности основания и выполненным, например, в виде диска с радиальными упругими лепестками с возможностью их прогиба при перемещении и/или наклоне инерционного тела. Выполнение контакта с радиальными лепестками уменьшает усилие, необходимое для его упругой деформации инерционным телом, следовательно, увеличивает величину прогиба радиальных лепестков, увеличивая длительность замыкания. Наличие в формируемой электрической цепи упругих лепестков увеличивает длительность замкнутого состояния контактов при срабатывании инерционного замыкателя, так как после ударного воздействия – спада ударного ускорения, электрические контакты не размыкаются сразу после начала обратного перемещения инерционного тела пружиной в исходное положение, что способствует надежному задействованию систем безопасности объекта применения даже при ударных ускорениях малой длительности. Выполнение инерционного тела с фланцем, которым оно поджато пружиной до взаимодействия с внутренней и торцевой поверхностями верхней части корпуса, обеспечивает работоспособность устройства от поперечных ускорений, обеспечивает наклон инерционного тела. Также для обеспечения настройки диаграммы чувствительности с целью адаптации инерционного замыкателя под разные объекты применения и обеспечения меньшей погрешности срабатывания по амплитуде и длительности ударного ускорения инерционное тело выполнено с отверстиями на торцах, диаметр и/или глубина которых определены требуемыми условиями сборки и настройки замыкателя. Также с целью обеспечения требуемой чувствительности инерционного тела в продольном и поперечном направлении инерционное тело выполнено составным с соосно установленным в центральное резьбовое отверстие сменным вкладышем с различной массой. *Результаты и выводы.* Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного замыкателя, обеспечивающего надежное срабатывание в системах безопасности подвижных объектов (автомобилей).

Ключевые слова: инерционный замыкатель, инерционное тело, надежность срабатывания, пространственная диаграмма срабатывания, математическая модель, дифференциальные уравнения

Для цитирования: Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель инерционного замыкателя // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 66–71. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-8

MATHEMATICAL MODEL OF THE INERTIA CLOSER

V.N. Kitaev¹, R.L. Afanasyev², M.V. Petrov³

^{1, 2, 3} Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
^{1, 2, 3} kb2@vniitf.ru

Abstract. *Background.* The inertia closer is designed for the electric circuit commutation when initiating the mobile item (vehicle) security systems. *Materials and methods.* The closer package with base of a dielectric material contains the inertial body in the form of revolution body, applied by spring to the top of the package; the body can move and/or tilt to contact electric interfaces, fixed on the base. The inertial body has a flange to tight the body with a spring to contact with inner and end surfaces of the top package. The arrangement has in addition an extra-contact in the initial state bitten about both the face of the inertial body and the base surface; the contact may be in the form of a disk with elastic radial blades, bending when the inertial body moving and/or tilting. The contact with radial blades reduces effort necessary for its elastic deformation by the inertial body, increasing hence the flexure of radial blades to prolong closing duration.

Elastic blades in the electrical circuit make longer the close-contact state after the inertial closer triggering, since deceleration after the impact doesn't result in breaking contact due to reverse motion of the inertial body moved by the spring to the initial state. This guarantees reliable triggering of the security systems even at impact accelerations of short duration. The flange of the inertial body, making contact of the latter with inner and end surfaces of top package, provides device operability under transverse acceleration through inclination of the inertial body. For sensitivity diagrams adjustment to adapt the inertia closer to different application and reduce activation errors, concerning amplitude and impact acceleration duration, the inertial body has holes at the end surfaces, which depth are specified by assembling and settings of the closer. To gain desired lengthwise and crosswise sensitivity the inertial body is of split-type with wear bushing of varying weight, inserting coaxially through central threaded hole. *Results and conclusions.* Shown work demonstrates possibility of development of the reliable and technologically effective inertial closer for failsafe operation of mobile vehicles' security system.

Keywords: inertia closer, inertial body, reliable triggering, spatial triggering diagram, mathematical model, differential equations

For citation: Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of the inertia closer. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):66–71. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-8

Назначение инерционного замыкателя

Инерционный замыкатель предназначен для использования в системах коммутации электрических цепей задействования систем безопасности подвижных объектов (автомобилей).

Техническое решение инерционного замыкателя обеспечивает надежное срабатывание – замыкание контакта с увеличенной длительностью замкнутого состояния при ударном ускорении в продольном и/или поперечном направлениях.

Конструкция инерционного замыкателя

Конструкция инерционного замыкателя представлена на рис. 1–6.

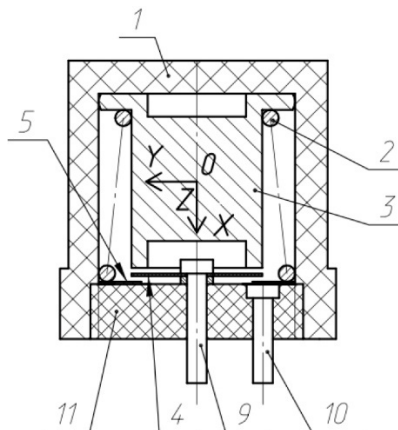


Рис. 1. Инерционный замыкатель в исходном состоянии

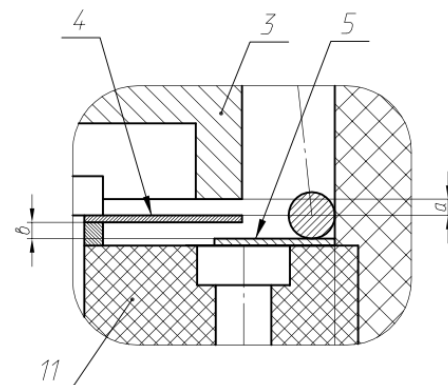


Рис. 2. Межконтактные зазоры

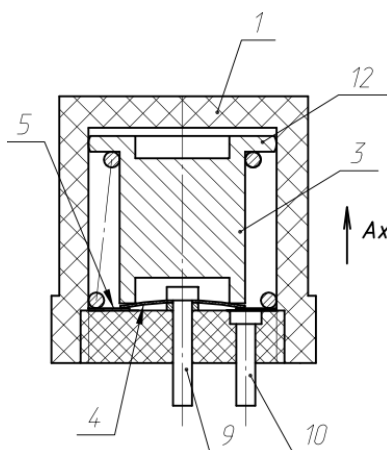


Рис. 3. Инерционный замыкатель в сработавшем состоянии при ускорении в продольном направлении

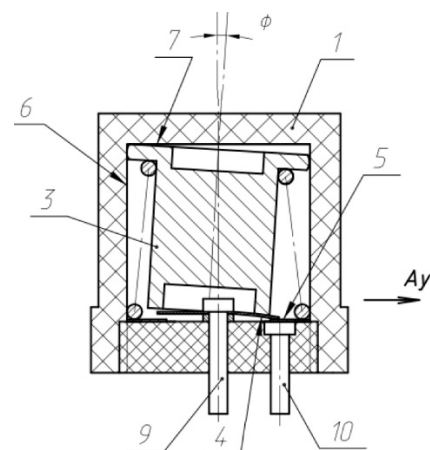


Рис. 4. Инерционный замыкатель в сработавшем состоянии при ускорении в поперечном направлении

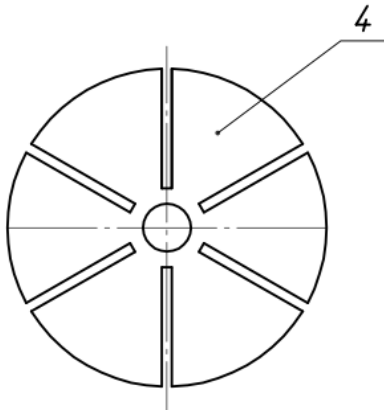


Рис. 5. Конструкция диска с упругими радиальными лепестками

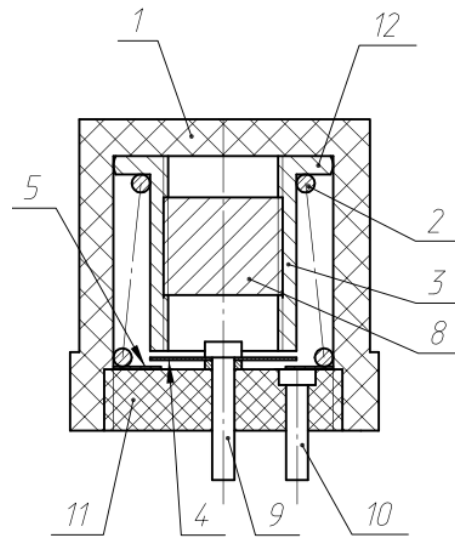


Рис. 6. Вариант конструкции инерционного замыкателя в исходном состоянии с составным инерционным телом

Инерционный замыкатель выполнен следующим образом.

В корпусе 1 (см. рис. 1) из диэлектрического материала с основанием 11, также из диэлектрического материала, размещено поджатое пружиной 2 к верхней части корпуса 1 инерционное тело 3. Инерционное тело 3 выполнено в виде цилиндра с фланцем 12 на торце, которым оно поджато пружиной 2 до взаимодействия с внутренней цилиндрической 6 и торцевой 7 поверхностями верхней части корпуса 1. На основании 11 закреплены на токовыводе 10 электрические контактные поверхности 5 в виде шайбы, и на токовыводе 9 — контакт 4. Токовывод 9 закреплен в центре основания 11, что обеспечивает одинаковую чувствительность в любом поперечном направлении. Контакт 4 выполнен в виде диска с радиальными упругими лепестками (рис. 5) с возможностью их прогиба при перемещении и/или наклоне инерционного тела 3 и установлен в исходном положении с зазорами a и b относительно торцевой поверхности инерционного тела 3 и поверхности основания 11 соответственно (см. рис. 2). Инерционное тело 3 установлено с возможностью перемещения и/или наклона до взаимодействия торцевой поверхностью с электрическими контактными поверхностями 5.

На торцах инерционного тела 3 могут быть выполнены отверстия, глубиной и/или диаметром которых в процессе сборки обеспечивается настройка диаграммы чувствительности инерционного замыкателя.

Также инерционное тело 3 может быть выполнено составным (рис. 6) с соосно установленным в центральное резьбовое отверстие сменным вкладышем 8 с различной массой. Массой вкладыша 8 обеспечивается требуемая чувствительность в продольном направлении, а его осевым расположением в инерционном теле 3 — в поперечном направлении.

Настраиваемая диаграмма чувствительности позволит адаптировать заявляемый инерционный замыкатель для разных объектов применения и обеспечить меньшую погрешность срабатывания по амплитуде и длительности ударного ускорения.

Для обеспечения больших контактных давлений между контактами 4, 5, а следовательно, и обеспечения стабильных электрических параметров, инерционное тело 3 может быть выполнено из тяжелого сплава на основе вольфрама.

Для повышения безопасности — снижения вероятности перемыкания проводов коммутируемой электрической цепи в объекте применения корпус 1 выполнен из диэлектрического материала.

Работа инерционного замыкателя

Инерционный замыкатель работает следующим образом.

При потере скорости от столкновения с преградой инерционное тело 3 перемещается по оси (см. рис. 3) или наклоняется в боковом направлении (см. рис. 4), в зависимости от угла столкновения с преградой, определяющего направление ударного ускорения A , и касается лепестков диска 4, замыкая электрическую цепь, и далее упруго отгибает их до упора в шайбу 5. Замкнутая электрическая цепь, например системы безопасности автомобиля, задействует натяжители ремней безопасности и/или подушки безопасности.

При спаде ударного ускорения за счет увеличенной упругой деформации лепестков диска 4 электрический контакт между ними и инерционным телом 3 разомкнется не в момент начала отжатия инерционного тела 3 пружиной 2 в исходное положение, а только после возврата лепестков в исходное (недеформированное) состояние, т.е. длительность замкнутого состояния электрической цепи увеличится на время, необходимое для выборки зазора v (см. рис. 2), повышая надежность срабатывания систем безопасности объекта применения.

Математическая модель инерционного замыкателя

Введем прямоугольную правую систему координат $OXYZ$, связанную с инерционным замыкателем. Начало системы координат – в центре масс инерционного тела 3 при исходном состоянии инерционного замыкателя. Направления осей и ускорения (A_x, A_y) показаны на рис. 1. В силу симметрии конструкции будем рассматривать ее функционирование в плоскости OXY задаваемой линией действия ускорения и осью симметрии корпуса 1.

Перемещение инерционного тела 3 от начального положения по оси OX обозначим через $X_{ит}$. $X_{ит} = X_a$ – координата в момент контакта инерционного тела 3 с диском 4, зазор a выбран, $X_{ит} = X_{max}$ – максимальная координата инерционного тела 3, зазор v выбран.

Перемещение инерционного тела 3 от начального положения по оси OY обозначим через $Y_{ит}$. φ – угол между осью OX и осью инерционного тела 3.

Силы, действующие на инерционное тело 3 инерционного замыкателя, рассмотрены ниже.

Сила инерции $\vec{F}_{ин}$, действующая на инерционное тело 3 определяется следующим образом:

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

где $m_{пр}$ – приведенная масса инерционного тела 3; $\vec{a}_{из}$ – ускорение инерционного замыкателя в центре масс инерционного тела 3:

$$\vec{a}_{из} = (a_{из_x}; a_{из_y}; a_{из_z}), \quad (2)$$

где $a_{из_x}, a_{из_y}, a_{из_z}$ – проекции $\vec{a}_{из}$ на оси системы координат $OXYZ$ (в рассматриваемом двумерном случае $a_{из_z} = 0$).

Приведенная масса инерционного тела 3 определяется по формуле

$$m_{пр} = m_{ит} + \frac{1}{3} m_{пр}, \quad (3)$$

где $m_{ит}, m_{пр}$ – масса инерционного тела 3, пружины 2 соответственно (масса диска 4 не учитывается).

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

$$F_{пр} = F_{пр_0} + C_{пр} X_{ит}, \quad (4)$$

где $F_{пр_0}$ – начальное усилие пружины 2; $C_{пр}$ – коэффициент упругости пружины 2 (жесткость).

Величина силы упругости диска 4 $F_{дi}$ ($i = 5 \dots 8$) определяется следующим образом:

$$F_{дi} = \begin{cases} 0, & \text{если } X_{ит} \leq X_a; \\ C_{дi} (X_{ит} - X_a), & \text{если } X_{max} \geq X_{ит} > X_a, \end{cases} \quad (5)$$

где $C_{пр}$ – коэффициент упругости диска 8 (жесткость).

Реакции $\vec{R}_i$ ($i = 1 \dots 4$) сил действуют на корпус 1 со стороны инерционного тела 3 в местах их контакта (см. рис. 4).

Систему уравнений движения инерционного тела 3 запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} m_{пр} \ddot{X}_{ит} = (\vec{F}_{ин} + \vec{F}_{пр} + \sum_{i=5}^{i=8} \vec{F}_{дi} + \sum_{i=1}^{i=6} \vec{R}_i)_x; \\ m_{пр} \ddot{Y}_{ит} = (\vec{F}_{ин} + \sum_{i=1}^{i=4} \vec{R}_i)_y; \\ J_{ит} \ddot{\varphi} = M_{пр} + \sum_{i=5}^{i=8} M_{дi} + \sum_{i=1}^{i=4} M_{Ri}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\ddot{X}_{ит}$ – вторая производная по времени от координаты $X_{ит}$; $\ddot{Y}_{ит}$ – вторая производная по времени от координаты $Y_{ит}$; $\ddot{\varphi}$ – вторая производная по времени от угла φ ; $J_{ит}$ – момент инерции инерционного тела 3 относительно оси, параллельной OZ, проходящей через центр масс инерционного тела; $M_{пр}$ – момент силы упругости пружины 2; $M_{дл}$ – момент сил упругости диска 2, действующих в местах контакта с инерционным телом 3 (см. рис. 4); M_{Ri} – момент реакций сил, действующих на корпус 1 со стороны груза 3 в местах их контакта (см. рис. 4).

Система уравнений (6) решается численно при начальных условиях: $t = 0$ с, $X_{ит} = 0$ м и заданной зависимости ускорения инерционного замыкателя от времени.

Это позволяет определить режимы, при которых срабатывает инерционный замыкатель, либо подобрать конструктивные параметры, обеспечивающие его срабатывание при требуемых режимах.

Достигнутые результаты

Представленные результаты показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного замыкателя, предназначенного для использования в системах коммутации электрических цепей задействования систем безопасности подвижных объектов (автомобилей).

Представленная математическая модель значительно сократила продолжительность разработки инерционного замыкателя, позволив выбрать еще при выпуске конструкторской документации оптимальные конструктивные параметры. Необходимость разработки математических моделей приборов с инерционным принципом действия подтверждается по результатам ранее проведенных разработок [2, 3].

Список литературы

1. Пат. № 621.316.54. Инерционный замыкатель / В. Н. Китаев, Л. Ю. Кудрявцева. Заявка № 2024133314 от 07.11.2024, МПК F42 C 1/04.
2. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Инерционный включатель с гидравлическим демпфированием инерционного тела // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 88–97. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10
3. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель порогового инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 30–40.

References

1. Patent № 621.316.54. *Inertsionnyy zamykatel' = Inertial circuit breaker*. V.N. Kitaev, L.Yu. Kudryavtseva. Appl. № 2024133314 from 07.11.2024, MPK F42 C 1/04. (In Russ.)
2. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Inertial switch with hydraulic damping of an inertial body. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):88–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10
3. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of a threshold inertial switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):30–40. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Николаевич Китаев

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

Vladimir N. Kitaev

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

Роман Львович Афанасьев

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

Максим Владимирович Петров

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

Roman L. Afanasyev

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

Maksim V. Petrov

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 18.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 17.12.2024

Принята к публикации/Accepted 15.01.2025

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 622.691.48

doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-9

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕТОКА ГАЗА ЧЕРЕЗ КРАНОВЫЙ УЗЕЛ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Д. С. Бояркин¹, В. Д. Ежижанский², Д. А. Голушко³, И. Р. Абузьяров⁴, А. В. Лысенко⁵

^{1, 2, 3, 4} Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

⁵ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ boyarkyndmytry@gmail.com, ² vityastalkerxdxd@gmail.com, ³ dmitgoluschko@yandex.ru,

⁴ 0400@npp-rubin.ru, ⁵ lysenko_av@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Длительная эксплуатация запорной арматуры газопроводов приводит к постепенному износу элементов уплотнения шаровых кранов и, как результат, к их негерметичности. Это является причиной подавляющего большинства аварий на магистральных газопроводах и компрессорных станциях. Разработан алгоритм определения наличия утечки газа и измерения величины его расхода в кране при потере им герметичности с помощью регистрации и анализа акустического сигнала, производимого газом, истекающим через неисправный крановый узел. Обнаружение утечки на ранних стадиях позволяет вовремя провести профилактические мероприятия по ее устранению, сохранить кран в рабочем состоянии и избежать последствий, связанных с аварийно-восстановительными работами при ликвидации чрезвычайных ситуаций. *Материалы и методы.* Для обнаружения утечек газа в запорной арматуре магистральных газопроводов путем регистрации и анализа акустического сигнала применяется метод акустико-эмиссионного контроля. Проанализирован состав аппаратной части устройства определения перетока, предназначенного для обнаружения и определения степени утечки газа через крановый узел трубопроводной арматуры. *Результаты и выводы.* Предложено описание варианта конструкции и структурная схема устройства определения перетока газа. Приведено описание алгоритма работы устройства и его блок-схема. Сделан вывод о необходимости и актуальности применения предложенного алгоритма определения величины перетока газа через крановый узел трубопроводной арматуры.

Ключевые слова: трубопроводная арматура, запорная арматура, шаровый кран, утечка газа, техническое обслуживание, алгоритм, микроконтроллер

Для цитирования: Бояркин Д. С., Ежижанский В. Д., Голушко Д. А., Абузьяров И. Р., Лысенко А. В. Алгоритм определения величины перетока газа через крановый узел трубопроводной арматуры // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 72–79. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-9

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE AMOUNT OF GAS FLOW THROUGH THE VALVE ASSEMBLY OF PIPELINE FITTINGS

D.S. Boyarkin¹, V.D. Yezhizhanskiy², D.A. Golushko³, I.R. Abuzyarov⁴, A.V. Lysenko⁵

^{1, 2, 3, 4} Scientific and Production Enterprise "Rubin", Penza, Russia

⁵ Penza State University, Penza, Russia

¹ boyarkyndmytry@gmail.com, ² vityastalkerxdxd@gmail.com, ³ dmitgolushko@yandex.ru,

⁴ 0400@npp-rubin.ru, ⁵ lysenko_av@bk.ru

Abstract. *Background.* Prolonged operation of gas pipeline shut-off valves leads to gradual wear of the sealing elements of ball valves and, as a result, to their leakiness. This is the cause of the vast majority of accidents at main gas pipelines and compressor stations. A technique has been developed to determine the presence of a gas leak and measure the amount of its flow in a crane when it loses its tightness by recording and analyzing the acoustic signal produced by gas flowing through a faulty crane assembly. Detection of a leak at an early stage allows timely preventive measures to eliminate it, keep the crane in working condition and avoid the consequences associated with emergency recovery operations. *Materials and methods.* To detect gas leaks in the shut-off valves of main gas pipelines by recording and analyzing the acoustic signal, the acoustic emission control method is used. The composition of the hardware of the device (flow sensor) designed to detect and determine the degree of gas leakage through the valve assembly of the pipeline fittings is analyzed. *Results and conclusions.* A description of the design variant and a block diagram of the gas flow sensor are proposed. The description of the operation of the device's software module and the flowchart of the algorithm are given. The conclusion is made about the necessity and relevance of using the proposed method for detecting gas leaks in shut-off valves of main gas pipelines.

Keywords: pipeline fittings, shut-off valves, ball valve, gas leak, maintenance, algorithm, microcontrollers

For citation: Boyarkin D.S., Yezhizhanskiy V.D., Golushko D.A., Abuzyarov I.R., Lysenko A.V. Methodology for determining the amount of gas flow through the valve assembly of pipeline fittings. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):72–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-9

Введение

Трубопроводный транспорт имеет особое значение для газовой отрасли Российской Федерации. Протяженность магистральных газопроводов (МГ) России на момент 2024 г. составляет порядка 176 тысяч километров и непрерывно возрастает. Рабочие давления МГ увеличиваются, газопроводы прокладываются во все более сложных климатических и инженерно-геологических условиях.

Транспортировка газа и газотранспортная система в целом относится к опасным производственным объектам и является технически сложной отраслью, сопряженной с высокими рисками для жизни и здоровья как для персонала, непосредственно осуществляющего техническое обслуживание объектов, так и людей, проживающих рядом с газопроводами. По данным Ростехнадзора, ежегодно на линейных частях магистральных газопроводов происходят десятки инцидентов и аварий [1]. Подавляющее большинство аварий происходит вследствие утечек газа, возникающих по разным причинам [2–4]. Последствия таких утечек представляют серьезную опасность для человека, оборудования и окружающей среды, а также могут повлечь значительные финансово-экономические потери в виде недопоставок газа потребителям и штрафных санкций¹.

Под утечкой понимается неорганизованная эмиссия природного газа, поступающая в атмосферу в виде ненаправленных потоков в результате нарушения герметичности оборудования². Среди различных источников утечек газа существенную роль играет негерметичность затвора запорной арматуры. Краны становятся негерметичными в процессе их эксплуатации и воздействия механических примесей, перемещающихся с транспортируемым газом [5].

Безопасность и эффективность работы всей газотранспортной системы, в том числе экономическая, во многом зависит от текущего состояния трубопроводной арматуры (ТПА) газопроводов. К ТПА относятся шаровые краны (ШК), различные задвижки и запорная арматура (ЗА), обеспечивающие перекрытие газопровода и остановку потока газа³. Краны ТПА должны обеспечивать стабильность работы и герметичность в течение всего срока службы. От работоспособности ТПА зависит, как быстро будет локализован участок, на котором произошла разгерметизация газопровода в случае аварии.

¹ ГОСТ Р 59061–2020. Охрана окружающей среды. Загрязнение атмосферного воздуха. Термины и определения : национальный стандарт РФ.

² СТО Газпром 2-3.5-454–2010. Правила эксплуатации магистральных газопроводов : стандарт организации.

³ ГОСТ 24856–2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения : межгосударственный стандарт.

В связи с этим возникает необходимость разработки устройства, способного определять текущее состояние шарового крана, а именно его герметичность. Герметичность необходимо контролировать ввиду постоянно происходящего износа как уплотнительных седел шарового крана, так и запорного элемента. При отсутствии герметичности ЗА газ продолжает перетекать по затвору из одной отсекаемой части газопровода в другую. Данное явление получило название «переток». Степень перетока может быть выражена количественной характеристикой, отражающей величину утечки газа через крановый узел.

Определение перетока на ранних стадиях позволяет вовремя провести профилактические мероприятия по его устранению, сохранить кран в рабочем состоянии и избежать экономических потерь, связанных с аварийно-восстановительными работами при ликвидации ЧС.

Помимо перетока, газ может уходить также через уплотнения шпинделя кранового узла. В этом случае утечка газа происходит в окружающую среду, что при больших масштабах утечки приводит к образованию скоплений газа вокруг ШК, что является ЧС и требует немедленного выезда аварийной бригады для ликвидации течи¹.

Таким образом, разрабатываемое устройство должно обеспечивать обнаружение наличия и определение степени перетока через затвор крана в закрытом положении (степень герметичности по отношению к изолированным участкам газопровода), а также определять наличие утечек газа в атмосферу на шаровом кране при любом положении затвора (степень герметичности МГ по отношению к внешней среде).

Описание аппаратной части устройства определения перетока газа

Принцип работы устройства определения перетока газа основан на применении метода акустико-эмиссионного контроля (АЭК) – это метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе акустических волн, возникающих при истечении газа через негерметичную запорную арматуру. Используя данный метод, путем регистрации и анализа акустического сигнала можно определить наличие перетока и оценить количественные потери газа в кране при потере им герметичности.

Структурная схема устройства определения перетока газа представлена на рис. 1.

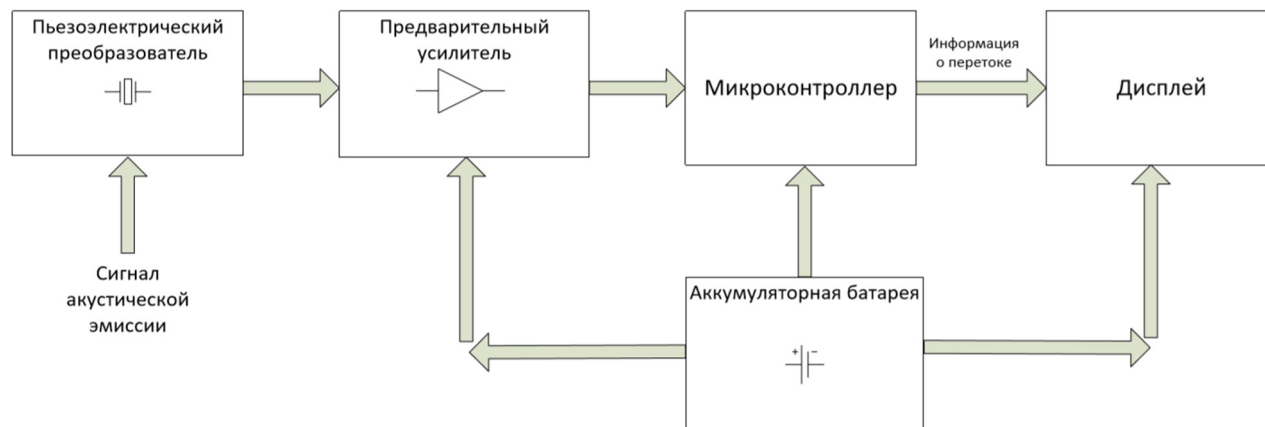


Рис. 1. Структурная схема устройства определения перетока газа

В состав устройства входят: пьезоэлектрический преобразователь для регистрации и преобразования акустического сигнала, возникающего при утечке газа, в электрический сигнал, предварительный усилитель, усиливающий преобразованный сигнал по напряжению, микроконтроллер семейства *STM32*, предназначенный для аналого-цифрового преобразования сигнала, его фильтрации от помех и дальнейшей обработки и анализа. Информация об обработанном сигнале и степени перетока выводится на дисплей, подключенный к микроконтроллеру. Питание предварительного усилителя, микроконтроллера и дисплея осуществляется от аккумуляторной батареи типа 18 650 с использованием *DC-DC* преобразователей и стабилизаторов напряжения.

Для обеспечения функционирования устройства необходим программный алгоритм, который должен быть загружен в память микроконтроллера. Согласно алгоритму, устройство должно

¹ СТО Газпром 031–2007. Методика проведения измерений объемов эмиссии метана в атмосферу на объектах ОАО «Газпром»: стандарт организации.

определять наличие либо отсутствие перетока в крановом узле ТПА, и при обнаружении такового вычислять его величину.

Алгоритм определения величины перетока газа

Работа алгоритма разделена на два этапа. На первом этапе осуществляется серия из пяти измерений частотного спектра сигнала, поступающего на аналоговый вход контроллера. На втором этапе результаты измерений анализируются и определяется величина перетока газа. Блок-схема алгоритма определения величины перетока газа представлена на рис. 2.

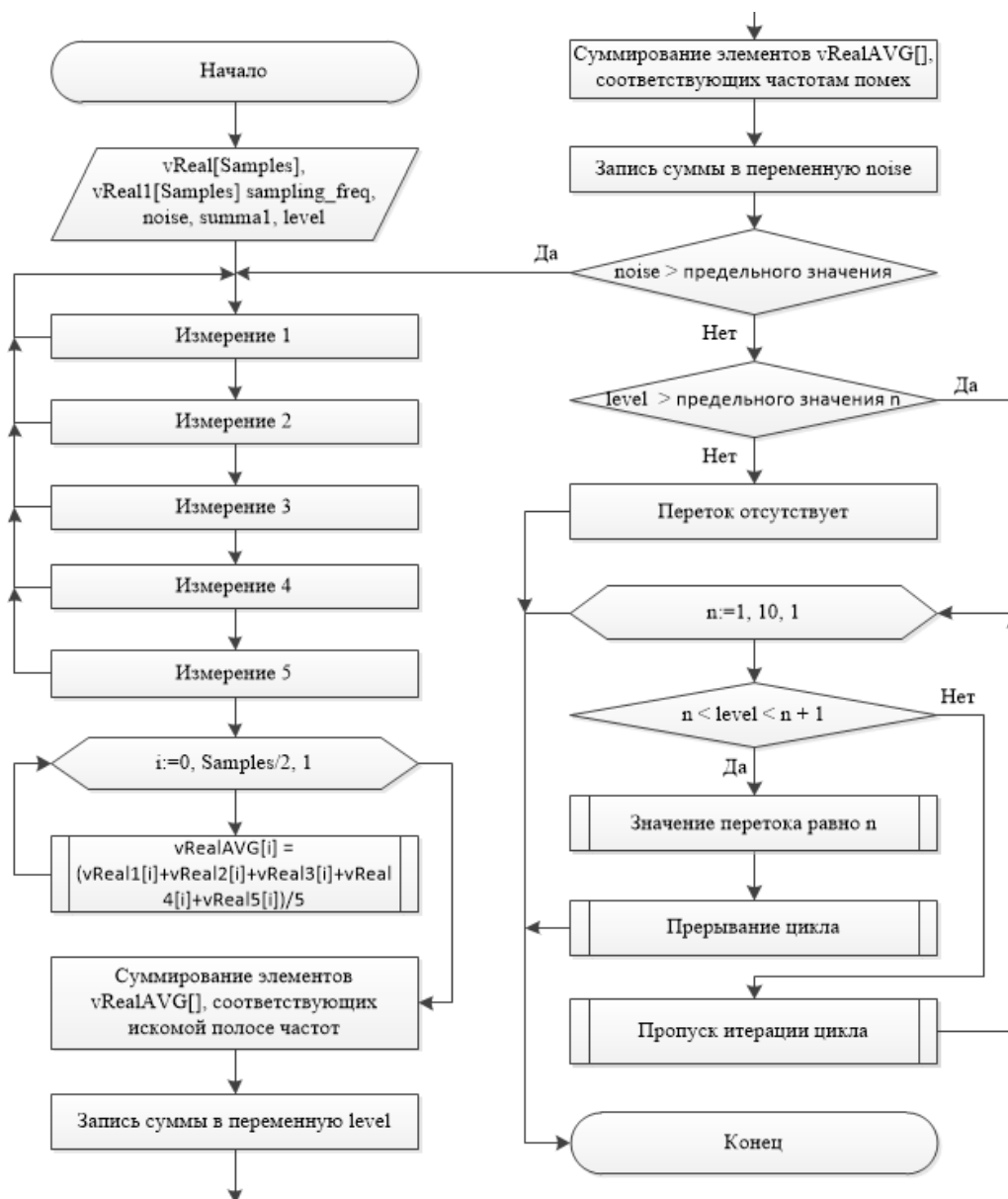


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения величины перетока газа

Работа алгоритма начинается с проведения серии из пяти измерений, результатом каждого из которых является массив данных, содержащий частотный спектр исследуемого акустического сигнала. Результаты всех измерений усредняются и записываются в массив *vRealAVG*. Далее элементы массива, соответствующие частотам помех, суммируются и записываются в переменную *noise*. Элементы массива, соответствующие искомой полосе частот сигнала перетока, суммируются и записываются в переменную *level*.

В конце выполнения алгоритма проверяется ряд условий. В случае, если переменная *level* превышает минимальное пороговое значение обнаружения перетока и одновременно с этим переменная

noise не превышает порогового значения сигнала помех, то делается вывод о том, что переток обнаружен. Последующая цепь условий определяет его степень (уровень), которая выражается в условных относительных единицах и определяется исходя из пределов, в которых лежит переменная *level*.

В случае, если переменная *level* не превышает минимальное пороговое значение обнаружения перетока, то делается вывод о том, что переток отсутствует. В случае, если переменная *noise* превышает пороговое значение, то выводится сообщение о превышении уровня помех и происходит возврат к началу работы программы.

Работа функции измерения сигнала акустической эмиссии и его обработки основана на математическом алгоритме быстрых преобразований Фурье (*fast Fourier transform, FFT*). Алгоритм *FFT* применяется для анализа сигналов и предназначен для преобразования данных об измеренном сигнале из временной области в частотную, разлагая их на составляющие. Алгоритм *FFT* позволяет сформировать массив данных, отражающий акустический спектр частот принимаемого сигнала утечки, который затем можно использовать для спектрального анализа сигнала. Входными данными для алгоритма *FFT* служат частота дискретизации сигнала, количество измерений сигнала за одну итерацию и массив величин напряжений сигнала, измеренных через промежуток времени, равный выбранному периоду дискретизации.

Алгоритм проведения измерения спектра сигнала акустической эмиссии представлен на рис. 3.

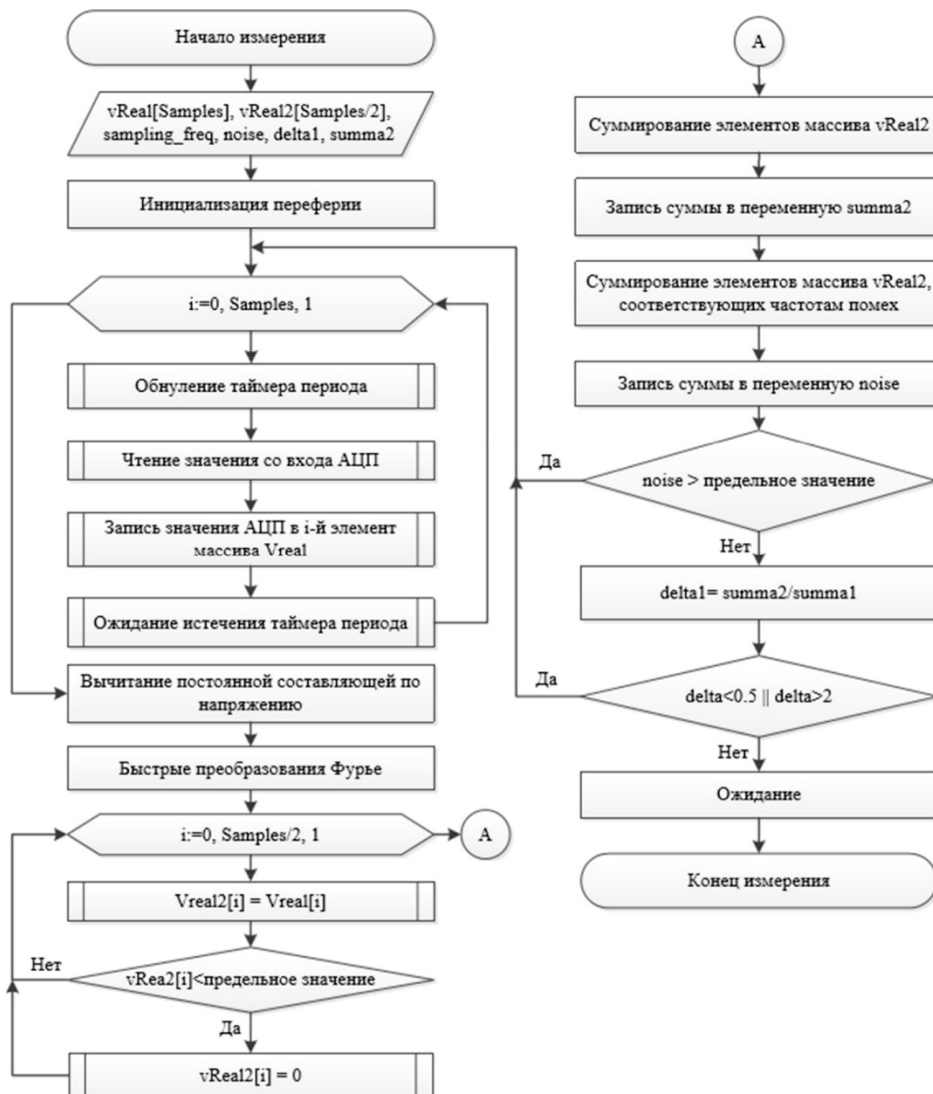


Рис. 3. Блок-схема алгоритма измерения спектра сигнала акустической эмиссии

Каждое из пяти измерений начинается с цикла чтения значений величин сигнала с АЦП микроконтроллера. Цикл наполняет массив *vReal*, количество значений в котором определяется переменной *samples*. Разница во времени между измерениями значений напряжения на входе АЦП равна периоду дискретизации сигнала – величине, обратной частоте дискретизации. Затем из значений наполненного

массива данных вычитается постоянная составляющая по напряжению, оставляя данные лишь о переменном сигнале, после чего массив данных преобразуется в акустический спектр с помощью алгоритма *FFT*. Таким образом, с увеличением порядкового номера элемента массива увеличивается частота, которой соответствует величина сигнала в этом элементе. Шаг частоты зависит от выбранного значения для переменной *samples*, т.е. от количества элементов в массиве. Шаг частоты Δ определяется по следующей формуле:

$$\Delta = \frac{F_d}{n}, \quad (1)$$

где F_d – частота дискретизации сигнала; n – переменная *samples*, т.е. количество элементов в массиве.

После преобразования массива *vReal* в спектр создается новый массив *vReal1*, в который записывается результат первого измерения (частотный спектр). Количество элементов данного массива в два раза меньше, чем в *vReal*, что объясняется тем, что в результате выполнения *FFT* приемлемым результатом является лишь первая половина массива. Поэтому верхний предел измеряемой частоты сигнала равен половине частоты дискретизации. Полученный массив фильтруется от помех, величина которых ниже некоторого предельного значения, устанавливаемого экспериментальным способом. Этот этап проводится с целью исключения их дальнейшего влияния на итоговый результат.

Затем все элементы массива суммируются и полученный результат записывается в соответствующую переменную *summa1*. Таким образом определяется общий уровень сигнала. Эта переменная потребуется в дальнейших измерениях.

Далее производится проверка на наличие в спектре сигнала посторонних частот (помех), которые в спектре сигнала утечки присутствовать не должны, а также искомого сигнала утечки. Эта операция осуществляется с учетом того, что частоты утечки и пороговое значение для помех известны заранее и получены экспериментально. Элементы массива, соответствующие частотам помех, суммируются и записываются в переменную *noise*. После этого проверяется условие, превышает ли переменная *noise* установленное пороговое значение. В случае превышения результаты измерения не учитываются, а выполнение алгоритма начинается заново. Если порог не превышен, выполнение алгоритма продолжается. Таким образом, в случае возникновения помех в спектре анализируемого сигнала измерения будут продолжаться до тех пор, пока их источник не будет устранен.

После проверки спектра сигнала на наличие в нем помех осуществляется поиск отношения сумм всех элементов массива (общего уровня сигнала, переменные *summa1–summa5*) текущего измерения и предыдущего (не производится для первого из пяти измерений, так как отсутствуют результаты предыдущего измерения). В случае отличия этих сумм в два раза и более выполнение алгоритма возвращается в начало. Это необходимо для того, чтобы установить, присутствует ли в акустическом сигнале постоянная во времени составляющая, источником которой является переток газа, а также для того, чтобы исключить влияние на итоговый результат сигнала непостоянных во времени помех, так как в случае наличия таковых итоговые суммы элементов массива будут значительно (более, чем в 2 раза) отличаться, и измерения начнутся заново. После каждого из пяти измерений устанавливается задержка, которая позволяет вести серию измерений на определенном промежутке времени, позволяя определить наличие или отсутствие постоянной составляющей сигнала утечки на некотором временном отрезке, а не в какой-то конкретный момент времени.

Заключение

Таким образом, в статье предложена структурная схема устройства определения перетока газа в крановом узле ТПА, а также описан алгоритм его работы. Устройство предназначено для анализа акустических сигналов с целью определения возникновения нарушения герметичности кранового узла и степени перетока газа. Определение перетока на ранних стадиях позволяет вовремя провести профилактические мероприятия по его устранению, сохранить кран в рабочем состоянии и избежать экономических потерь, связанных с аварийно-восстановительными работами при ликвидации ЧС. Своевременное обнаружение утечек природного газа на шаровых кранах позволяет ускорить время оперативного реагирования аварийных служб [6]. Рассмотренный алгоритм обнаружения перетока газа может помочь в обеспечении стабильности работы и герметичности запорной арматуры магистральных газопроводов в течение всего срока службы. Поэтому использование предложенного алгоритма для диагностики состояния узлов трубопроводной арматуры во время проведения ее технического обслуживания позволит повысить безопасность и эффективность (в том числе экономическую) работы всей газотранспортной системы в целом.

Список литературы

1. Уроки, извлеченные из аварий // Ростехнадзор. URL: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/index.php> (дата обращения: 10.10.2024).
2. Yurkov N. K., Tankov G. V., Lysenko A. V., Trusov V. A. On the problem of experimental research of forced vibrations of plates // *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016, (Saint-Petersburg, 25–27 May 2016)*. Saint-Petersburg : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. P. 416–418. doi: 10.1109/SCM.2016.7519798 EDN: XFNVOX
3. Надырбеков Г. Ж., Григорьев А. В., Кочегаров И. И. [и др.]. Структурное описание размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2017. Т. 2. С. 11–13.
4. Grishko A. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. [et al.] Determination of Electromagnetic Field Strength Taking into Account the Influence of Reflections // *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 : proceedings (Moscow, 11–13 March 2020)*. Moscow, 2020. P. 9067494. doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067494 EDN: AYBROC
5. Короленок А. М., Тухбатуллин Ф. Г., Колотилов Ю. В. Обеспечение промышленной безопасности компрессорных станций путем диагностики негерметичности запорной арматуры // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2015. № 5. С. 68–71
6. Бояркин Д. С., Асеев Е. А., Голушко Д. А. [и др.]. Протокол регистрации технического обслуживания трубопроводной арматуры // *Надежность и качество сложных систем*. 2024. № 2. С. 95–102. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-11

References

1. Lessons learned from accidents. *Rostekhnadzor = Rostekhnadzor*. (In Russ.). Available at: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/index.php> (accessed 10.10.2024).
2. Yurkov N.K., Tankov G.V., Lysenko A.V., Trusov V.A. On the problem of experimental research of forced vibrations of plates. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016, (Saint-Petersburg, 25–27 May 2016)*. Saint-Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016: 416–418. doi: 10.1109/SCM.2016.7519798 EDN: XFNVOX
3. Nadyrbekov G.Zh., Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I. et al. Structural description of the blurring of the image of a circular mark during reciprocating vibration movement of the material point under study. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;2:11–13. (In Russ.)
4. Grishko A.K., Kochegarov I.I., Lysenko A.V. et al. Determination of Electromagnetic Field Strength Taking into Account the Influence of Reflections. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020: proceedings (Moscow, 11–13 March 2020)*. Moscow, 2020:9067494. doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067494 EDN: AYBROC
5. Korolenok A.M., Tukhbatullin F.G., Kolotilov Yu.V. Ensuring industrial safety of compressor stations by diagnosing leakage of shut-off valves. *Territoriya «NEFTEGAZ» = The territory of NEFTEGAZ*. 2015;(5):68–71. (In Russ.)
6. Boyarkin D.S., Aseev E.A., Golushko D.A. et al. Protocol of registration of maintenance of pipeline fittings. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):95–102. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-11

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Сергеевич Бояркин

техник-конструктор,
Научно-производственное
предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: boyarkyndmytry@gmail.com

Виктор Дмитриевич Ежижанский

инженер,
Научно-производственное
предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: vityastalkerxdxd@gmail.com

Dmitry S. Boyarkin

Technician designer,
Scientific and Production Enterprise "Rubin"
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Viktor D. Yezhizhansky

Engineer,
Scientific and Production Enterprise "Rubin"
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Дмитрий Александрович Голушко

кандидат технических наук, начальник отдела,
Научно-производственное
предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: dmitgoluschko@yandex.ru

Ильдар Ринатович Абузяров

начальник отделения,
Научно-производственное
предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: 0400@npp-rubin.ru

Алексей Владимирович Лысенко

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

Dmitry A. Golushko

Candidate of technical sciences,
head of department,
Scientific and Production Enterprise "Rubin"
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Ildar R. Abuzyarov

Head of department,
Scientific and Production Enterprise "Rubin"
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Aleksey V. Lysenko

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 02.12.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.12.2024

Принята к публикации / Accepted 13.01.2025

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ АНТЕНН

А. Н. Якимов

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* При автоматизированном проектировании антенн различного назначения одной из основных решаемых задач является контроль параметров диаграмм направленности этих антенн в процессе их оптимизации для обеспечения требований технического задания. К таким параметрам обычно относят ширину главного лепестка амплитудной диаграммы направленности на уровне половинной или нулевой мощности, а также максимальный уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны. При проектировании остронаправленных микроволновых антенн требования к точности определения параметров амплитудной диаграммы направленности оказываются существенными и необходимы дополнительные исследования возможности использования известных математических методов для решения этой задачи. *Материалы и методы.* Предложен подход к определению параметров амплитудной диаграммы направленности антенны при ее автоматизированном проектировании, основанный на использовании численного метода поиска максимума или минимума функций действительных переменных, описывающих эту диаграмму направленности. Показаны возможности программной реализации полученных решений в системе MATLAB. *Результаты и выводы.* Приведены результаты модельного исследования возможностей определения ширины главного лепестка амплитудной диаграммы направленности на заданном уровне численным методом касательных Ньютона. Дана оценка погрешности определения ширины диаграммы направленности, рассчитанной с использованием этого метода. Показана перспективность использования метода касательных Ньютона, а также матричных представления и методов анализа матриц для контроля ширины главного лепестка амплитудной диаграммы направленности и уровня ее боковых лепестков при автоматизированном проектировании остронаправленных микроволновых антенн.

Ключевые слова: микроволновая антенна, диаграмма направленности, главный лепесток, боковые лепестки, контроль параметров, численный метод

Для цитирования: Якимов А. Н. Использование численного метода для контроля параметров диаграмм направленности при автоматизированном проектировании антенн // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 80–85. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-10

USING THE NUMERICAL METHOD TO CONTROL OF PARAMETERS OF RADIATION PATTERNS AT AUTOMATED ANTENNA DESIGN

A.N. Yakimov

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

Abstract. *Background.* In the automated design of antennas for various purposes, one of the main tasks to be solved is to control of parameters of the radiation patterns of these antennas in the process of optimizing them to meet requirements of the technical specification. These parameters usually include the width of the main lobe of the amplitude radiation pattern at half or zero level power, as well as the maximum level of the side lobes of the radiation pattern of the antenna. *Materials and methods.* An approach to determining the parameters of the amplitude radiation pattern of an antenna in its automated design is proposed, based on the use of a numerical method for searching for the maximum or minimum of functions of real variables describing this radiation pattern. The possibilities of software implementation of the obtained solutions in the MATLAB system are shown. *Results and conclusions.* The results of a model study of the possibilities of determining the width of the main lobe of the amplitude radiation pattern at a given level using the numerical method of Newton tangents are presented. An estimate of the error in determining the width of the radiation

pattern calculated use this method is given. The prospects of using the Newton tangent method, as well as matrix representations and matrix analysis methods to control of the width of the main lobe of the amplitude radiation pattern and the level of its side lobes in the automated design of acutely directional microwave antennas are shown.

Keywords: microwave antenna, radiation pattern, main lobe, side lobes, control of parameters, numerical method

For citation: Yakimov A.N. Using the numerical method to control of parameters of radiation patterns at automated antenna design. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):80–85. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-10

Введение

Одной из основных задач, решаемых для обеспечения требований технического задания при автоматизированном проектировании антенн различного назначения, является контроль параметров диаграмм направленности (ДН) этих антенн в процессе их оптимизации. К таким параметрам обычно относят ширину главного лепестка амплитудной ДН на уровне половинной или нулевой мощности, а также максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ) ДН антенны. При этом возникает задача математического синтеза ДН, предполагающая нахождение амплитудно-фазового распределения источников возбуждения в антенне, относящаяся к некорректным задачам математической физики, решение которых может быть получено лишь с некоторым приближением [1–3].

В рамках автоматизированного проектирования микроволновой антенны при решении задачи синтеза исходным соотношением является операторное уравнение вида

$$Au = f, \quad u \in U, \quad f \in F, \quad (1)$$

где u – искомое распределение источников возбуждения антенны; f – ДН антенны – элементы нормированных пространств U, F соответственно; A – интегральный оператор, который математически описывает существующий физический процесс трансформации распределения возбуждения антенны в поле излучения дальней зоны, с областью определения $D(A) \subset U$ и областью значений $R(A) \subset F$. При этом обратный оператор A^{-1} многозначный и не является непрерывным.

Известно, что задача определения решения u из пространства U по «исходным данным» f из пространства F является корректно поставленной на паре метрических пространств (U, F) , только когда выполняются условия корректности Адамара [4]:

- 1) для всякого элемента $f \in F$ существует решение u из пространства U ;
- 2) решение определяется однозначно;
- 3) задача устойчива на пространствах U и F .

Особенностью решения некорректных задач, к которым относится задача синтеза антенны, является невозможность оценить близость приближенного решения задачи к точному. Однако если известно, что точное решение задачи существует и принадлежит некоторому компактному множеству, то задача становится корректно поставленной и появляется возможность оценки погрешности решения [5].

Аналитические зависимости между геометрическими или электрофизическими характеристиками антенн и параметрами формируемых ими ДН установлены лишь для простейших типов антенн и ограниченного числа видов распределений источников возбуждения в них [6, 7].

Обычно в системах автоматизированного проектирования антенн задачу синтеза решают через анализ: путем расчета ДН антенн по распределению источников возбуждения в антенне, что позволяет исследовать влияние вида распределения, а также геометрических и электрофизических характеристик антенны на ее ДН в процессе оптимизации. При этом на каждом шаге оптимизации требуется оценка близости параметров формируемых антенной ДН с их значениями в техническом задании [1].

Для остронаправленных микроволновых антенн требования к точности определения параметров амплитудной ДН оказываются существенными и возникает необходимость дополнительных исследований возможности использования известных математических методов для решения этой задачи.

Постановка задачи

Рассмотрим микроволновую антенну с остронаправленной ДН. Такую ДН можно считать разделяющейся, что позволяет принять допущение об одинаковой форме ее горизонтального сечения $F(\varphi)$ для разных фиксированных значений угла θ в вертикальной плоскости. При этом вертикальное

сечение ДН $F(\theta)$ имеет одинаковую форму для разных фиксированных значений угла φ в горизонтальной плоскости.

Пространственная осесимметричная амплитудная ДН остронаправленной антенны $F(\varphi, \theta)$ в этом случае полностью определяется функциями, описывающими ДН в ее главных плоскостях:

$$F(\varphi, \theta) = F(\varphi)F(\theta), \quad (2)$$

где $F(\varphi, \theta)$ – функция, описывающая пространственную ДН антенны по полю; $F(\varphi)$, $F(\theta)$ – функции, описывающих ДН по полю в горизонтальной (азимутальной) и вертикальной (угломестной) плоскостях соответственно при $\varphi = 0^\circ$ и $\theta = 0^\circ$; φ , θ – углы относительно оси излучения антенны в направлении точки наблюдения в горизонтальной и вертикальной плоскостях [8].

Таким образом, появляется возможность управления формой ДН антенны за счет изменения амплитудно-фазового распределения электрической составляющей электромагнитного поля в каждой из плоскостей декартовой системы координат отдельно в процессе ее оптимизации.

Перспективным подходом к контролю параметров ДН антенны при ее автоматизированном проектировании является использование численных методов поиска максимума или минимума действительных переменных. Эти методы позволяют с высокой точностью определить аргумент функции одной переменной в точке ее перегиба. К этому классу функций относят и функции, описывающие ДН в ее главных плоскостях. Среди численных методов, позволяющих решать подобные задачи, одним из перспективных является метод касательных Ньютона [9, 10].

Решение задачи

Рассмотрим возможности определения методом касательных Ньютона параметров амплитудной остронаправленной ДН микроволновой антенны в ее главных плоскостях на примере ДН в горизонтальной плоскости (рис. 1).

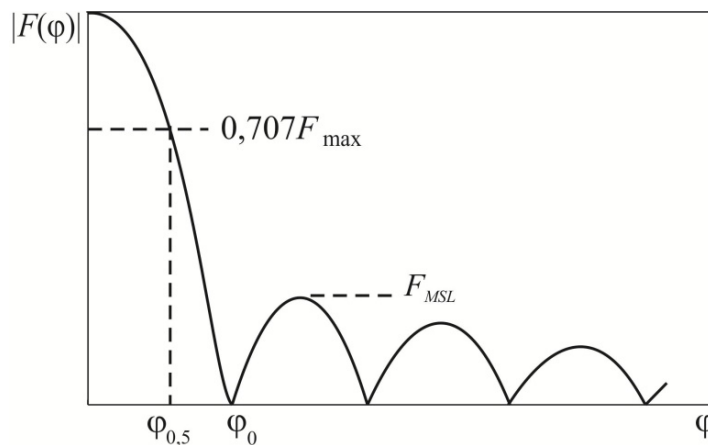


Рис. 1. Амплитудная осесимметричная ДН остронаправленной антенны

Здесь $\varphi_{0,5}$, φ_0 – половина ширины главного лепестка ДН на уровне половинной мощности (соответствует $0,707 F_{\max}$, т.е. 0,707 от максимального уровня главного лепестка ДН по полю) и на уровне нулевой мощности соответственно; F_{MSL} – максимальный уровень боковых лепестков ДН.

Для такой антенны при равноамплитудном синфазном распределении возбуждающих источников в качестве математической модели амплитудной ДН антенны $F(\varphi)$ по полю (рис. 2) может быть выбрана функция [1, 7]

$$F(\varphi) = \frac{\sin[(kL/2)\sin\varphi]}{(kL/2)\sin\varphi}, \quad (3)$$

где φ – угол относительно оси излучения антенны в направлении точки наблюдения в горизонтальной плоскости; L – линейный горизонтальный размер излучающей поверхности антенны; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина излучаемой электромагнитной волны.

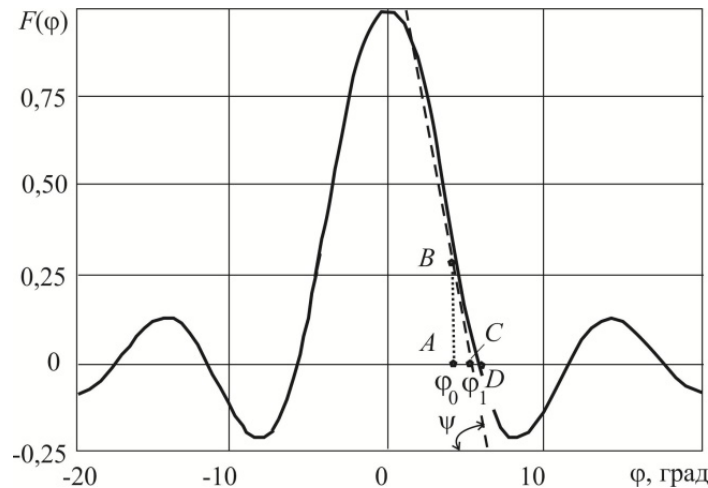


Рис. 2. Иллюстрация к определению ширины осесимметричной ДН методом касательных Ньютона

Для определения ширины главного лепестка ДН на уровне половинной мощности $2\varphi_{0,5}$ в соответствии с методом касательных Ньютона выполняются следующие процедуры. Задается BC – касательная в точке B к функции $F(\varphi)$, описывающей ДН в горизонтальном сечении. Определяются A – проекция точки B на ось φ , C – точка, в которой касательная пересекает ось φ , ψ – угол между BC и осью φ . Тогда OC является аппроксимацией отрезка OD , соответствующего точке D и половине ширины ДН на нулевом уровне φ_0 .

Таким образом, задавая угол φ_0 , соответствующий точке B , можно, исходя из геометрических построений, получить приближенное значение φ_1 половины ширины ДН на нулевом уровне, соответствующее точке C . Учитывая, что в соответствии с рис. 2 $OC = OA + AC$ и $AB / AC = \tan \psi = F'(\varphi_0)$, для точки φ_0 получим $AC = AB / F'(\varphi_0) = F(\varphi_0) / F'(\varphi_0)$. Принимая во внимание отрицательный знак производной функции $F(\varphi)$ в области анализа, приближенное значение φ_1 опишется выражением

$$\varphi_1 = \varphi_0 - F(\varphi_0) / F'(\varphi_0). \quad (4)$$

Величина φ_1 может быть исходным значением для дальнейшей более точной аппроксимации. Итерации могут быть продолжены до тех пор, пока для двух последующих аппроксимаций не будет достигнута заданная точность. При этом расчетная формула в общем случае примет вид

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n - F(\varphi_n) / F'(\varphi_n), \quad (5)$$

где $n = 0, 1, 2, 3 \dots$, $\varphi_0, \varphi_n, \varphi_{n+1}$ – промежуточные приближенное и уточнение значения половины ширины ДН на нулевом уровне.

Аналогичная процедура может быть применена и для определения ширины ДН на уровне половинной мощности, т.е. 0,707 максимального нормированного уровня 1 по полю. При этом функция, описывающая ДН, должна быть представлена как $F_1(\varphi) = F(\varphi) - 0,707$, т.е. уровень анализа ДН должен быть приведен к нулю.

Полученные результаты

В качестве тестовой задачи выбрано определение ширины ДН линейной антенны размером $L = 10 \lambda$ с равноамплитудным синфазным распределением источников излучения. При расчете по известным формулам [7] ширины ДН на уровне половинной ($2\varphi_{0,5} = 50,8 \lambda/L$) и нулевой ($2\varphi_0 = 114,8 \lambda/L$) мощности для заданного размера антенны L получаем $2\varphi_{0,5} = 5,08^\circ$, $2\varphi_0 = 11,48^\circ$. Метод касательных Ньютона, реализованный в системе MATLAB для заданной точности $|F(\varphi)| < 10^{-3}$ и начальной точки аппроксимации, равной $\varphi_0 = 0,1$ ($2\varphi_{0,5}$), позволил получить $2\varphi_{0,5} = 5,078^\circ$ и $2\varphi_0 = 11,478^\circ$.

Таким образом, отклонение ширины ДН, рассчитанной по методу касательных Ньютона, от соответствующего значения, полученного по стандартной формуле, составило $0,002^\circ$. Эти данные подтверждают высокую точность метода, достаточную для большинства практических расчетов.

Заключение

Предложенный подход позволяет определить не только ширину ДН, но и УБЛ ДН, если предварительно оценить точку перехода от главного к боковому лепестку или от одного бокового лепестка к другому и задать начальную точку аппроксимации для определения экстремума функции, описывающей ДН на заданном отрезке. Другим подходом к расчету указанных параметров, реализованным в большинстве математических пакетов прикладных программ, является использованная для проведения расчетов представления данных массивом. Например, в системе MATLAB для нахождения максимального и минимального элементов массива, представленного в виде матрицы, существуют специальные функции *max* и *min* соответственно [11].

Этот подход может быть также использован и для контроля параметров ДН, описываемых при автоматизированном проектировании разными функциями в области главного и боковых лепестков [12].

Полученные результаты дают основание рекомендовать метод касательных Ньютона, а также матричные представления и методы анализа матриц для использования в автоматизированном проектировании остронаправленных микроволновых антенн с целью контроля ширины ДН и уровня ее боковых лепестков.

Список литературы

1. Воскресенский Д. И., Кременецкий С. Д., Гринев А. Ю., Котов Ю. В. Автоматизированное проектирование антенн и устройств. М. : Радио и связь, 1988. 240 с.
2. Минкович. Б. М., Яковлев В. П. Теория синтеза антенн. М. : Сов. радио, 1969. 296 с.
3. Зелкин Е. Г., Кравченко В. Ф. Задачи синтеза антенн и новые методы их решения. М. : ИПРЖР, 2002. Кн. 1. 72 с.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1974. 224 с.
5. Титаренко В. Н., Ягола А. Г. Метод отсечения выпуклых многогранников и его применение к некорректным задачам // Вычислительные методы и программирование. 2000. Т. 1, вып. 1. С. 8–13.
6. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. Устройства СВЧ и антенны / под ред. Д. И. Воскресенского. М. : Радиотехника, 2006. 376 с.
7. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л. : Судостроение, 1967. 518 с.
8. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М. : Сов. радио, 1974. 536 с.
9. Калиткин Н. Н. Численные методы. СПб. : БХВ-Петербург, 2014. 592 с.
10. Якимов А. Н. Методы определения параметров при расчете диаграммы направленности антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 74–75.
11. 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.
12. Якимов А.Н. Универсальная модель излучения микроволновой антенны // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 5–12. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-1
13. Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Зуев Д. В. [и др.]. Автоматизация визуально-измерительного контроля // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 119–126. doi: 10.21685/2307-4205-2021-4-13
14. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. К проблеме автоматизированного проектирования антенны вивальди для излучения сверхширокополосного электромагнитного импульса // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 87–101. doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-9

References

1. Voskresenskiy D.I., Kremenetskiy S.D., Grinev A.Yu., Kotov Yu.V. *Avtomatizirovannoe proektirovanie antenn i ustroystv = Computer-aided design of antennas and devices*. Moscow: Radio i svyaz', 1988:240. (In Russ.)
2. Minkovich B.M., Yakovlev V.P. *Teoriya sinteza antenn = Theory of antenna synthesis*. Moscow: Sov. radio, 1969:296. (In Russ.)
3. Zelkin E.G., Kravchenko V.F. *Zadachi sinteza antenn i novye metody ikh resheniya = Antenna synthesis problems and new methods for their solution*. Moscow: IPRZhR, 2002;Bk.1:72. (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. Titarenko V.N., Yagola A.G. The method of clipping convex polyhedra and its application to ill-posed problems. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye = Computational methods and programming*. 2000;1(1):8–13. (In Russ.)
6. Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. *Ustroystva SVCh i antennoy = Microwave devices and antennas*. Moscow: Radiotekhnika, 2006:376. (In Russ.)
7. Kyun R. *Mikrovolnovyye antennoy = Microwave antennas*. Leningrad: Sudostroenie, 1967:518. (In Russ.)
8. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernyye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Sov. radio, 1974:536. (In Russ.)

9. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2014:592. (In Russ.)
10. 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.)
11. 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.)
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.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-1
13. Tulegulov A.D., Ergaliev D.S., Zuev D.V. et al. Automation of visual and measuring control. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):119–126. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-4-13
14. Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. On the problem of computer-aided design of a Vivaldi antenna for ultra-broadband electromagnetic pulse radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):87–101. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-9

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 25.10.2024

Поступила после рецензирования / Revised 20.11.2024

Принята к публикации / Accepted 30.11.2024

РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ, В ТОМ ЧИСЛЕ С ДИНАМИЧЕСКИ ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫМИ ПРЕДЕЛАМИ ИЗМЕРЕНИЙ, НА ОСНОВЕ МАТРИЧНЫХ СТРУКТУР

А. П. Мосеев¹, Б. В. Цыпин², С. А. Бростилов³, П. С. Горшков⁴, Н. А. Кузин⁵

^{1, 2, 3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

⁴ ООО «НПО Наука Софт», Москва, Россия

⁵ Московский автодорожный институт (технический университет), Москва, Россия

¹ moseew2008@mail.ru, ² rkarp@pnzgu.ru, ³ ser-brostilov@yandex.ru,

⁴ 7498405@mail.ru, ⁵ sputnik1985nk3y@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследуемое направление развития техники (матричные структуры, интегрированные в распределенные кластеры и многофункциональные интеллектуальные преобразователи давления на основе матричных структур, интегрированных в распределенные кластеры) является актуальным и перспективным. *Материалы и методы.* В работе была произведена разработка обобщенных принципов построения многофункциональных интеллектуальных преобразователей давления, в том числе с динамически переключаемыми пределами измерений, на основе матричных структур, интегрированных в распределенные кластеры. *Результаты.* На основе теоретических исследований изготовлена структура многофункционального интеллектуального преобразователя давления в пределах от 0 до 50 бар. При давлении 1 бар отклонение мембраны 1 составило 3,5 мкм, мембраны 2 – 0,3 мкм. *Выводы.* Эксперименты с изготовленным образцом подтвердили справедливость приведённых расчётов, в том числе линейность массива датчиков давления.

Ключевые слова: полупроводниковый датчик давления, измерение, кремневый чувствительный элемент, пьезорезисторы, полиимидный слой, технология эластичного прессованного межсоединения

Для цитирования: Мосеев А. П., Цыпин Б. В., Бростилов С. А., Горшков П. С., Кузин Н. А. Разработка многофункциональных интеллектуальных преобразователей давления, в том числе с динамически переключаемыми пределами измерений, на основе матричных структур // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 86–94. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-11

DEVELOPMENT OF MULTIFUNCTIONAL INTELLIGENT PRESSURE TRANSDUCERS, INCLUDING THOSE WITH DYNAMICALLY SWITCHABLE MEASUREMENT LIMITS, BASED ON MATRIX STRUCTURES

A.P. Moseev¹, B.V. Tsypin², S.A. Brostilov³, P.S. Gorshkov⁴, N.A. Kuzin⁵

^{1, 2, 3} Penza State University, Penza, Russia

⁴ LLC "NPO Nauka Soft", Moscow, Russia

⁵ Moscow Road Institute (Technical University), Moscow, Russia

¹ moseew2008@mail.ru, ² rkarp@pnzgu.ru, ³ ser-brostilov@yandex.ru,

⁴ 7498405@mail.ru, ⁵ sputnik1985nk3y@mail.ru

Abstract. *Background.* The studied direction of technology development (matrix structures integrated into distributed clusters and multifunctional intelligent pressure transducers based on matrix structures integrated into distributed clusters) is relevant and promising. *Materials and methods.* The paper developed generalized principles of construction of multifunctional intelligent pressure transducers, including those with dynamically switched measurement limits, based on matrix structures integrated into distributed clusters. *Results.* Based on theoretical studies, a structure of a multifunctional intelligent pressure transducer in the range from 0 to 50 bar was manufactured. At a pressure of 1 bar, the deviation of membrane 1 was 3.5 μm, membrane 2 – 0.3 μm. *Conclusions.* Experiments with the manufactured sample confirmed the validity of the calculations, including the linearity of the pressure sensor array.

Keywords: semiconductor pressure sensor, measurement, silicon sensitive element, piezoresistors, polyimide layer, elastic pressed interconnection technology

For citation: Moseev A.P., Tsypin B.V., Brostilov S.A., Gorshkov P.S., Kuzin N.A. Development of multifunctional intelligent pressure transducers, including those with dynamically switchable measurement limits, based on matrix structures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):86–94. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-11

За последнее время благодаря эффективному развитию отрасли электронных компонентов, микроэлектронных технологий, а также цифровых систем сбора и обработки информации на их основе стали возможными разработка и применение новых подходов к формированию измерительных задач [1–3]. Совершенствование операций традиционных микроэлектронных технологий, развитие технологий формирования МЭМС и НЭМС, технологий изготовления композиционных материалов и конструкций на их основе сформировало новую парадигму измерительных приборов и измерительных задач, а именно:

- многофункциональных интеллектуальных преобразователей, реализующих ленточный и матричный принцип компоновки чувствительных элементов;
- однокристалльных микроминиатюрных многофункциональных интеллектуальных измерительных преобразователей, основанных на применении МЭМС и НЭМС-технологий, способных реализовывать комплексные измерительные задачи на участке поверхности малой площади.

Для измерения давления в настоящее время широко используются полупроводниковые датчики давления, выполненные по кремниевой МЭМС-технологии [4–7].

Положительные свойства кремниевого ЧЭ определяют и свойства датчиков на его основе:

- минимальные массо-габаритные характеристики датчиков;
- низкая потребляемая энергия;
- минимальная стоимость за счет группового изготовления ЧЭ;
- надежность эксплуатации;
- стабильность параметров;
- массовость производства и широкая номенклатура.

Из приведенного выше следует, что для создания распределенных датчиков целесообразно использовать кремниевые ЧЭ в качестве измерительных модулей давления. В общем виде структура распределенного датчика может быть представлена в виде, изображенном на рис. 1 [8–10].

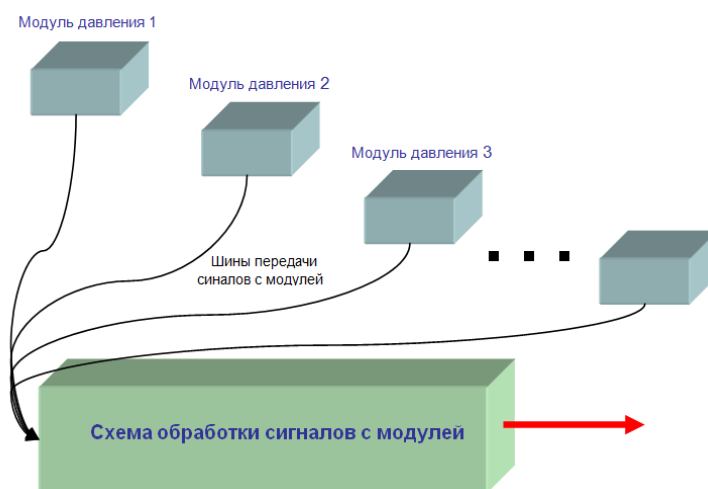


Рис. 1. Структурная схема распределенного датчика

В ходе анализа известных датчиков выявлены следующие особенности:

- конструктивно-технологическое исполнение деталей и узлов распределенных датчиков: измерительные модули, гибкие коммутационные платы;
- оригинальные схемные решения;
- способы повышения точности, надежности, стабильности метрологических характеристик полупроводниковых модулей.

Электронные устройства должны обладать меньшим весом и объемом, лучшими электрическими характеристиками, которые обеспечивают большую свободу проектирования и высокую надежность. Все эти преимущества востребованы в ракетно-космической технике (РКТ).

В центре CMST при IMEC были разработаны технология ультратонкой сборки (корпусирования) кристаллов (Ultra-Thin Chip Package, UTCP) и технология эластичного прессованного межсоединения (Stretchable Moulded Interconnect, SMI).

В соответствии с технологией UTCP кристаллы толщиной 20–30 мкм интегрируются в полиимидные слои. Тонкая металлизированная пленка наносится на разветвляющиеся контакты и позволяет создать очень миниатюрный, легкий и гибкий корпус толщиной менее 100 мкм. Технология SMI

основывается на стандартном методе производства гибко-жестких печатных плат. Эластичные межсоединения изготавливаются из меди в форме меандров с основой из гибкого материала (например, полиимида). Для заливки проводников и компонентов используются гибкие материалы, главным образом полиметилсилоксановый каучук, полиуретан или другой пластик, которые служат несущей основой электронной схемы.

Однако технологии изначально не были предназначены для использования в условиях космоса, их уникальные особенности позволяют надеяться на успешное освоение и этой области применения. Миниатюризация, которую обеспечивает метод UTCР, и простота интеграции в объемные конструкции благодаря гибкости электронных схем позволяют значительно сократить размеры и вес систем, что является важным преимуществом для их применения в космической технике. Важно и то, что прочность межсоединений, которую обеспечивают эти новые технологии, в дальнейшем можно повысить. Благодаря заливке в эластичные материалы, растягиваемые электронные устройства в меньшей мере чувствительны к вибрациям. Ультратонкие устройства можно встраивать в гибкие или жесткие печатные платы методами ламинирования, сверления сквозных отверстий и их металлизации. Производство по технологии UTCР и заливка печатных плат не требуют пайки, что позволяет избежать соответствующих проблем с надежностью эксплуатации в жестких условиях.

Чтобы обеспечить малый форм-фактор и гибкость, суммарная толщина корпуса кристалла должна быть менее 100 мкм. Этим требованиям удовлетворяет технология UTCР. На рис. 2 представлен общий вид устройства, выполненного по технологии UTCР. На рис. 3 показана последовательность операций в соответствии с технологией UTCР.



Рис. 2. Общий вид устройства, выполненного по технологии UTCР

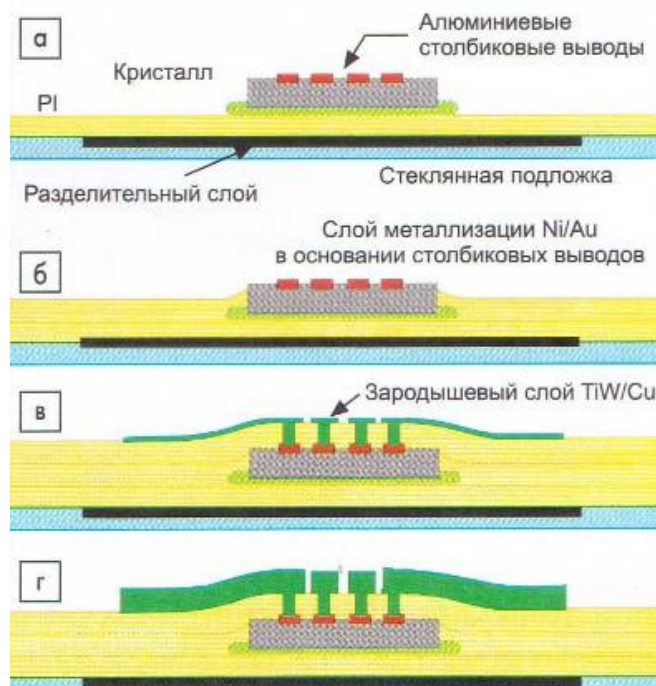


Рис. 3. Последовательность операций в соответствии с технологией UTCР

Процесс начинается с того, что поверх разделительного слоя стеклянной подложки наносится полиимидный слой. Далее в заданное положение устанавливается кристалл толщиной до 20 мкм. На его поверхность наносится фоточувствительная полиимидная пленка. Для формирования микро-рельефа в области над кристаллом часть полиимида удаляется. Эта пленка выступает в качестве выравнивающего слоя для третьего полиимидного слоя со схемой межсоединений. Металлическое покрытие заданной толщины создается напылением в вакууме медного зародышевого слоя с помощью электролитического метода. Наконец, на металлизированном слое формируется рисунок. Таким образом, на стеклянной подложке образуется гибкий промежуточный слой суммарной толщиной около 70 мкм.

Спрос на тонкие гибкие сборки и эластичные межсоединения обусловлен потребностью в большей функциональной плотности при меньшем форм-факторе или тех размерах, которые диктуются конкретным применением. Новые технологии, позволяющие увеличить функциональную плотность, уменьшить форм-фактор и адаптировать изделия к поверхности любой формы, становятся привлекательными для космических применений. Однако в этой области применения высокая прочность электронных устройств является наивысшим приоритетом.

По своей природе растягиваемые межсоединения обладают большим потенциалом механической прочности. Разделение крупной системы на небольшие модули, соединенные с помощью эластичных проводников, и поглощающие механические вибрации или удары позволяют защитить чувствительные к воздействиям компоненты, не прибегая к использованию противовибрационных рам [4].

Распределение воздействующей величины на эластичной мембране зависит от ее структуры и свойств материала мембраны. Компанией Microelectronics Research Center разработан массив датчиков давления (рис. 4).

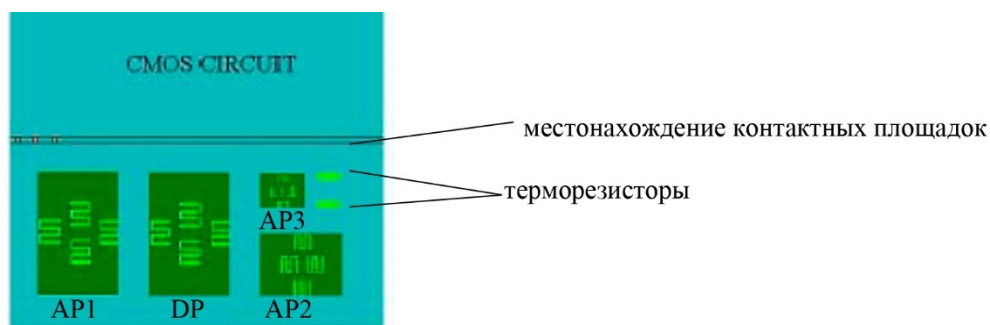


Рис. 4. Массив датчиков давления компании Microelectronics Research Center:
AP1, AP2, AP3 – мембраны чувствительных элементов абсолютного давления;
DP – мембрана чувствительного элемента дифференциального давления

Каждый датчик включает в себя три чувствительных элемента (ЧЭ) абсолютного давления, один ЧЭ дифференциального давления, ЧЭ температуры и схему сбора данных и обработки сигнала. Все воспринимающие резисторы выполнены из поликремния. Размер ЧЭ варьируется от десятков до сотен микрон, минимальная толщина – 2 мкм. Под мембраной расположены вакуумные полости и сквозные отверстия. Под воздействием давления мембраны деформируются, вызывая тем самым изменение сопротивления резисторов, расположенных на ее противоположной стороне.

Структуры ЧЭ дифференциального и абсолютного давления показаны на рис. 5, 6 [5].



Рис. 5. Структура ЧЭ дифференциального давления



Рис. 6. Структура ЧЭ абсолютного давления

Индийскими учеными был разработан массив МЭМС-датчиков давления для применения в морской воде. Типичные требования к датчику давления морской воды следующие:

- диапазон давлений – от 0 до 50 бар;
- разрешение 0,0001 % от верхнего предела измерений;
- нелинейность 0,001 % от верхнего предела измерений.

При таком разрешении минимальное измеряемое давление должно составлять 0,05 мбар. При измерении такого малого давления датчиком с одним ЧЭ с чувствительностью 0,02 мВ/В/бар выходной сигнал имеет величину порядка 3 нВ при напряжении питания 3,3 В, что требует схемы усиления на КМОП электронике с крайне низким уровнем шума.

Для получения указанных выше характеристик был разработан массив датчиков давления с множеством ЧЭ.

Чувствительность датчика давления с круглой мембраной составляет:

$$dR/R = \sigma_l/\pi_l + \sigma_t/\pi_t,$$

где dR/R – чувствительность; σ_l – продольная деформация; π_l – продольный пьезорезистивный коэффициент; σ_t – поперечная деформация; π_t – поперечный пьезорезистивный коэффициент:

$$\sigma_l = 3/8(q/h^2)[a^2(1 + \nu) - r^2(3 + \nu)];$$

$$\sigma_t = 3/8(q/h^2)[a^2(1 + \nu) - r^2(1 + 3\nu)];$$

$$\delta = (qa^4/16Eh^3)3(1 - \nu^2),$$

где q – давление; h – толщина мембраны; a – радиус мембраны; r – расстояние по радиусу от центра мембраны; ν – коэффициент Пуассона; δ – максимальное отклонение в центре мембраны; E – модуль Юнга.

Схематичное изображение массива датчиков давления показано на рис. 7.

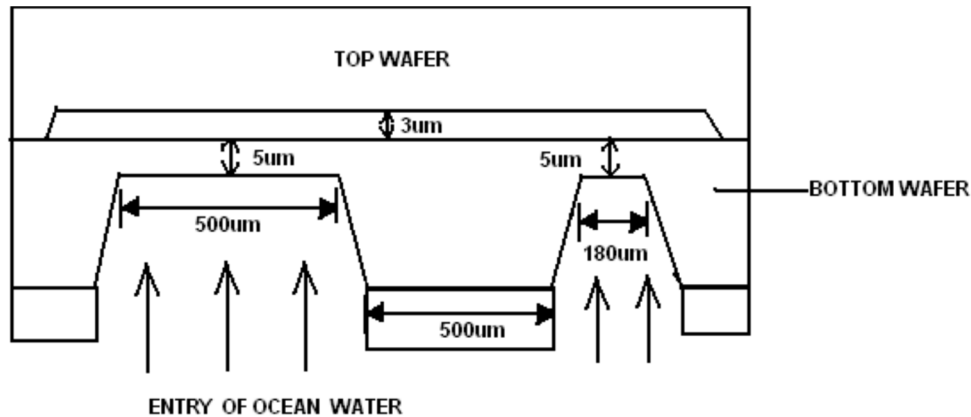


Рис. 7. Схематичное изображение массива датчиков давления

Верхняя пластина (top wafer) нужна для ограничения перемещения мембран в зазоре между верхней и нижней пластинами (bottom wafer). Таким образом предотвращается разрушение мембран под действием перегрузки.

Процесс изготовления массива датчиков давления показан на рис. 8, 9.

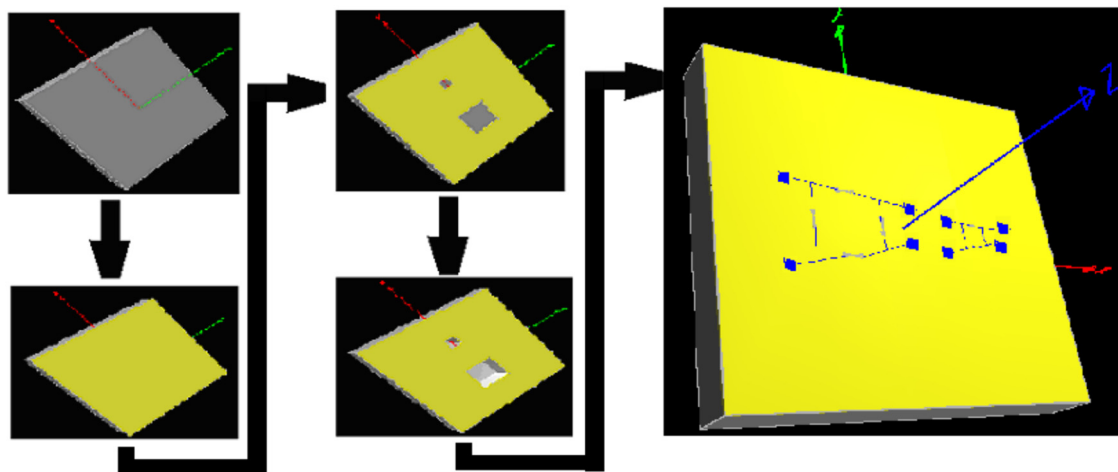


Рис. 8. Процесс изготовления первой подложки

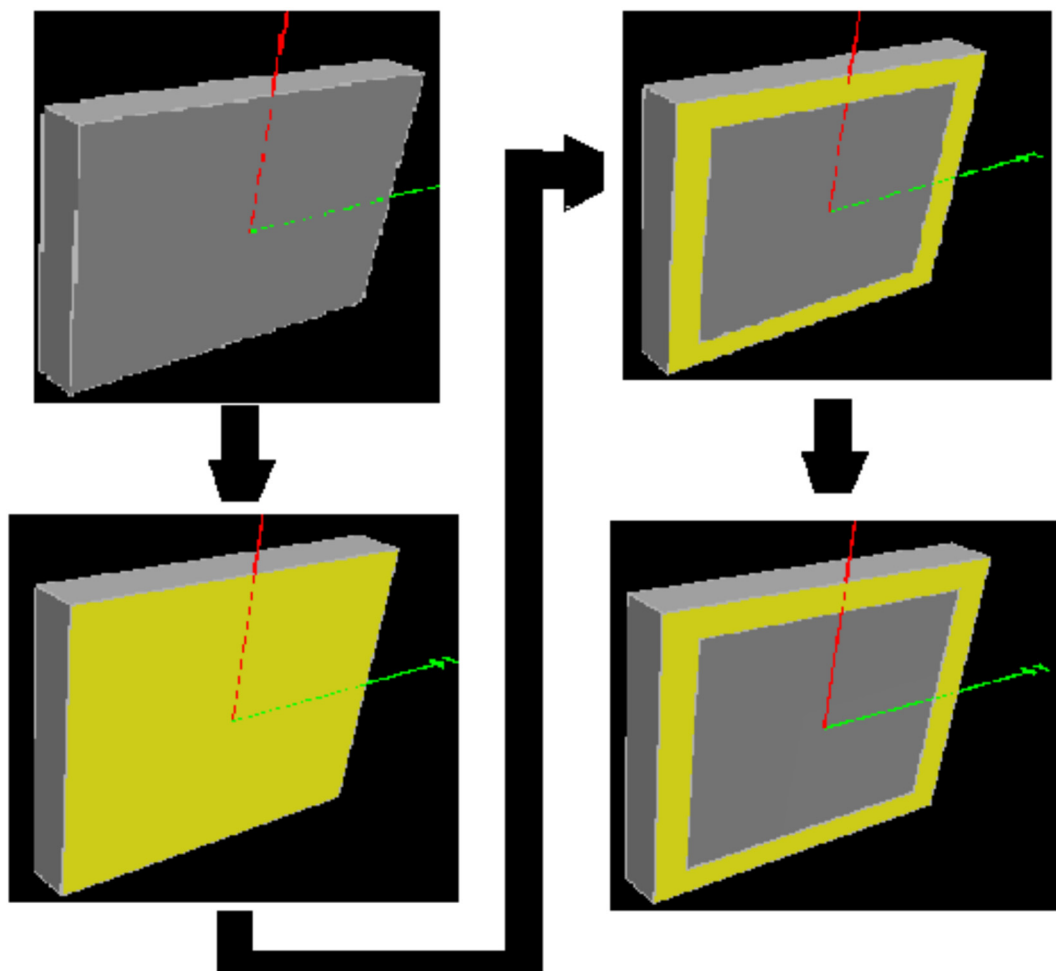


Рис. 9. Процесс изготовления второй подложки

Кремниевая пластина p -типа (100) сначала окисляется, затем в процессе литографии формируются две зоны на мембране. Микропрофилирование выполняется на отдельном этапе, толщина мембран одинаковая. Затем формируются пьезорезисторы и их соединение. На второй кремниевой подложке методами объемной микрообработки формируется полость. После вторая кремниевая подложка соединяется с первой.

Изготовленная структура предназначена для измерения давлений от 0 до 50 бар, распределение деформаций показано на рис. 10, отклонения мембран – на рис. 11. При давлении 1 бар отклонение мембраны 1 составило 3,5 мкм, мембраны 2 – 0,3 мкм, что соответствует расчетам.

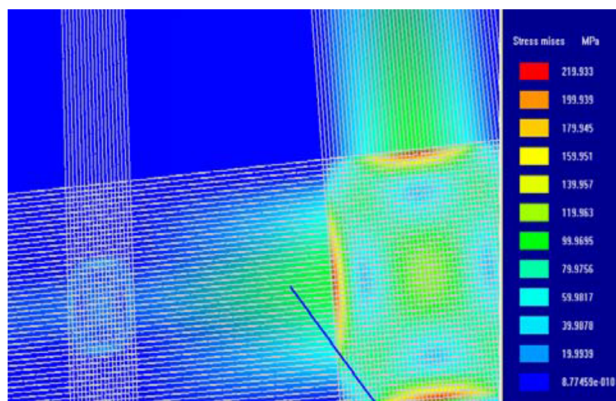


Рис. 10. Распределение деформаций

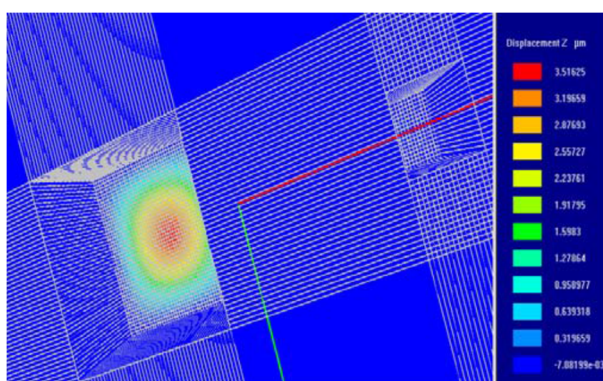


Рис. 11. Отклонение мембран

Изменение выходного напряжения двух мембран показано на рис. 12 и 13.

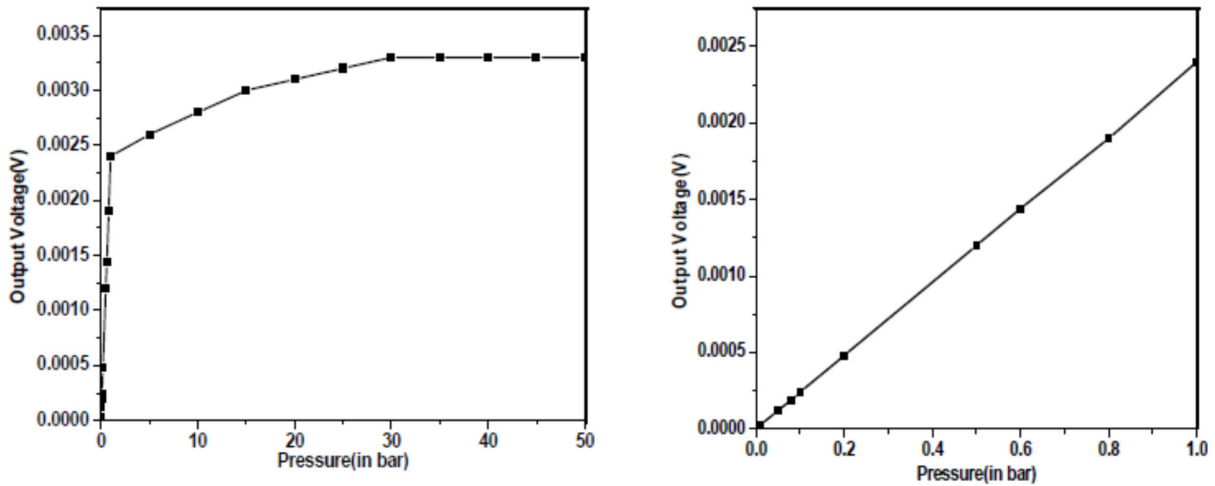


Рис. 12. Результаты мембраны 1

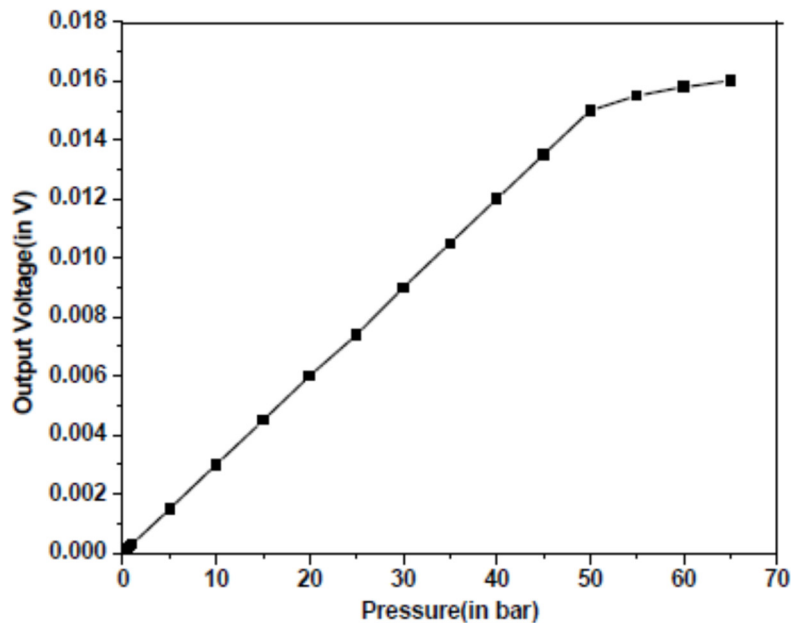


Рис. 13. Результаты мембраны 2

По рисункам видно, что выходное напряжение мембраны 1 достигает значения 0,003 В при давлении 1 бар, выходное напряжение мембраны 2 – величины 0,014 В, что соответствует результатам расчетов. Линейность массива датчиков давления, как видно из рис. 13, также соответствует расчетной.

Заключение

На основе теоретических исследований изготовлена структура многофункционального интеллектуального преобразователя давления в пределах от 0 до 50 бар. При давлении 1 бар отклонение мембраны 1 составило 3,5 мкм, мембраны 2 – 0,3 мкм. Эксперименты с изготовленным образцом подтвердили справедливость приведенных расчетов, в том числе линейность массива датчиков давления.

Список литературы

1. Бростилов С. А., Бростилова Т. Ю., Бекбаулиев А. О., Еремекбаев С. Ш. Создание и внедрение волоконно-оптических систем и датчиков давления на изделиях ракетно-космической и авиационной техники // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 16–17.
2. Григорьев А. В., Лысенко А. В., Бростилов С. А. [и др.]. Принципы конфигурирования систем измерения вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 4. С. 78–86.

3. Бростилов С. А., Бростилова Т. Ю., Кусаинов А. Б., Сарсенбеков С. Ж. Волоконно-оптические системы контроля температуры энергетических объектов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 2. С. 66–67.
4. Куве М., Босуи Ф., де Баэс Й., Вонфлитерен Я. Гибкие и эластичные системы для космических приложений / пер. В. Фомичев // Технологии в электронной промышленности. 2015. № 8. С. 34–38.
5. Jin J., Zhou Z. Simulation and Modeling of Micro Pressure Sensor Array // Microelectronics Research Center. 2002. Vol. 3. P. 82–86.
6. Михайлов П. Г., Мокров Е. А., Скотников В. В. [и др.]. Вопросы синтеза и анализа метрологических моделей пьезоэлектрических датчиков быстропеременных давлений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 1. С. 35–40.
7. Михайлов П. Г., Богонин М. Б., Михайлов А. П. Материалы микроэлектронных датчиков // Новые промышленные технологии. 2003. № 3. С. 28–32.
8. Зырянов Ю. Т., Калхиташвили Д. Ш., Хрипунов С. П. Разработка прототипа архитектуры интеллектуального микроконтроллера при реализации приложений интернета вещей // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 118–123.
9. Адамова А. А., Медведева Е. А., Семенцов С. Г. Интеллектуальный уровнемер с визуальным отсчетом для жидкостей // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 103–112.
10. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Савочкин А. Е., Семочкина И. Ю. Обеспечение надежности в жизненном цикле систем искусственного интеллекта ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 12–20.

References

1. Brostilov S.A., Brostilova T.Yu., Bekbauliev A.O., Ermekbaev S.Sh. Creation and implementation of fiber-optic systems and pressure sensors on products of rocket, space and aviation equipment. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:16–17. (In Russ.)
2. Grigor'ev A.V., Lysenko A.V., Brostilov S.A. et al. Principles of configuring vibration displacement measurement systems based on the analysis of blurring of a circular mark image. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(4):78–86. (In Russ.)
3. Brostilov S.A., Brostilova T.Yu., Kusainov A.B., Sarsenbekov S.Zh. Fiber-optic temperature control systems for energy facilities. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;2:66–67. (In Russ.)
4. Kuve M., Bosui F., de Baets Y., Vonfiteren Ya. Flexible and elastic systems for space applications. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti = Technologies in the electronic industry*. 2015;(8):34–38. (In Russ.)
5. Jin J., Zhou Z. Simulation and Modeling of Micro Pressure Sensor Array. *Microelectronics Research Center*. 2002;3:82–86.
6. Mikhaylov P.G., Mokrov E.A., Skotnikov V.V. et al. Issues of synthesis and analysis of metrological models of piezoelectric sensors of rapidly alternating pressures. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2014;(1):35–40. (In Russ.)
7. Mikhaylov P.G., Bogonin M.B., Mikhaylov A.P. Materials of microelectronic sensors. *Novye promyshlennye tekhnologii = New industrial technologies*. 2003;(3):28–32. (In Russ.)
8. Zyryanov Yu.T., Kalkhitashvili D.Sh., Khripunov S.P. Development of a prototype architecture for an intelligent microcontroller in the implementation of Internet of Things applications. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(3):118–123. (In Russ.)
9. Adamova A.A., Medvedeva E.A., Sementsov S.G. Intelligent level gauge with visual reading for liquids. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):103–112. (In Russ.)
10. Mikheev M.Yu., Prokof'ev O.V., Savochkin A.E., Semochkina I.Yu. Semochkina I. Yu. Ensuring reliability in the life cycle of artificial intelligence systems for responsible purposes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):12–20. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Павлович Мосеев

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: moseew2008@mail.ru

Anton P. Moseev

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

Борис Вульфович Цыпин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rkap@pnzgu.ru

Сергей Александрович Бростилов

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

Павел Сергеевич Горшков

доктор технических наук,
генеральный директор,
ООО «НПО Наука Софт»
(Россия, г. Москва, ул. Годовикова, 9, стр. 3)
E-mail: 7498405@mail.ru

Николай Андреевич Кузин

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

Boris V. Tsy-pin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of rocket,
space and aviation instrumentation,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Sergey A. Brostitlov

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

Pavel S. Gorshkov

Doctor of technical sciences,
general director,
LLC "NPO Nauka Soft"
(build. 3, 9 Godovikova street, Moscow, Russia)

Nikolai A. Kuzin

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 05.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 20.12.2024

Принята к публикации/Accepted 15.01.2025

ОБНАРУЖЕНИЕ НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ УТЕЧКИ ГАЗА

Д. С. Бояркин¹, В. Д. Ежижанский², Д. А. Голушко³, А. Ю. Кирсанов⁴, А. В. Лысенко⁵

^{1, 2, 3, 4} Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

⁵ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ boyarkyndmyrty@gmail.com, ² vityastalkerxdxd@gmail.com, ³ dmitgoluschko@yandex.ru,

⁴ malamash@yandex.ru, ⁵ lysenko_av@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Длительная эксплуатация запорной арматуры магистральных газопроводов приводит к постепенному износу элементов уплотнения шаровых кранов и задвижек и нарушению их герметичности. Своевременное обнаружение нарушения герметичности запорной арматуры на ранней стадии позволяет сохранить оборудование в рабочем состоянии и избежать последствий, вызванных большими объемами утечек газа. Проведено исследование параметров сигнала акустической эмиссии утечки газа, результаты которого могут быть применены при практической реализации способов диагностики запорной арматуры для обнаружения утечки газа при нарушении ее герметичности. *Материалы и методы.* Проведено моделирование утечки газа через запорную арматуру на лабораторном стенде для имитации утечки. Приведены описание лабораторного стенда и структурная схема устройства для регистрации и анализа спектра сигнала акустической эмиссии утечки газа. *Результаты и выводы.* Представлены частотные спектры сигнала акустической эмиссии утечки газа, снятые на лабораторном стенде, при различных объемах утечки. Проанализированы результаты измерений, сделаны выводы о критериях определения нарушения герметичности запорной арматуры по частотному спектру сигнала акустической эмиссии утечки.

Ключевые слова: трубопроводная арматура, запорная арматура, шаровой кран, утечка газа, переток, техническое обслуживание, акустическая эмиссия

Для цитирования: Бояркин Д. С., Ежижанский В. Д., Голушко Д. А., Кирсанов А. Ю., Лысенко А. В. Обнаружение негерметичности запорной арматуры магистральных газопроводов с помощью анализа частотного спектра сигнала акустической эмиссии утечки газа // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 95–102. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-12

LEAK DETECTION OF SHUT-OFF VALVES OF MAIN GAS PIPELINES BY ANALYZING THE FREQUENCY SPECTRUM OF THE ACOUSTIC EMISSION SIGNAL ABOUT A GAS LEAK

D.S. Boyarkin¹, V.D. Yezhizhanskiy², D.A. Golushko³, A.Yu. Kirsanov⁴, A.V. Lysenko⁵

^{1, 2, 3, 4} Scientific and Production Enterprise "Rubin", Penza, Russia

⁵ Penza State University, Penza, Russia

¹ boyarkyndmyrty@gmail.com, ² vityastalkerxdxd@gmail.com, ³ dmitgoluschko@yandex.ru,

⁴ malamash@yandex.ru, ⁵ lysenko_av@bk.ru

Abstract. *Background.* Prolonged operation of shut-off valves of main gas pipelines leads to gradual wear of the sealing elements of ball valves and valves and a violation of their tightness. Timely detection of leakage of the shut-off valves at an early stage allows you to keep the equipment in working condition and avoid the consequences caused by large volumes of gas leaks. A study of the parameters of the acoustic emission signal of a gas leak has been conducted, the results of which can be applied in the practical implementation of methods for diagnosing shut-off valves to detect gas leaks in case of violation of its tightness. *Materials and methods.* A simulation of a gas leak through a shut-off valve on a laboratory bench was carried out to simulate a leak. A description of the laboratory stand and a block diagram of a device for recording and analyzing the spectrum of the acoustic emission signal of a gas leak are given. *Results and conclusions.* The frequency spectra of the acoustic emission signal of a gas leak, taken on a laboratory stand, at various leakage volumes are presented. The measurement results are analyzed, conclusions are drawn about the criteria for

determining the leakproofness of the shut-off valves according to the frequency spectrum of the acoustic emission signal of the leak.

Keywords: pipeline fittings, shut-off valves, ball valve, gas leak, overflow, maintenance, acoustic emission

For citation: Boyarkin D.S., Yezhizhanskiy V.D., Golushko D.A., Kirsanov A.Yu., Lysenko A.V. Leak detection of shut-off valves of main gas pipelines by analyzing the frequency spectrum of the acoustic emission signal about a gas leak. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = *Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):95–102. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-12

Введение

В настоящее время добыча природного газа и его транспортировка выведены на уровень стратегически важных элементов экономики нашей страны. Магистральные газопроводы (МГ) и газопроводы распределительных сетей являются важнейшей частью энергетической инфраструктуры, которые обеспечивают природным газом населенные пункты и промышленные предприятия. В связи с высокими темпами развития газовой промышленности и ростом удельного веса природного газа, реализуемого на мировом и внутреннем российском рынках, наиболее актуальным является снижение удельных потерь природного газа (в том числе утечек метана), на газотранспортных объектах, возникающих в результате неисправностей оборудования. В числе неисправностей, вызывающих утечки газа, существенную роль играет негерметичность затвора запорной арматуры (ЗА) линейных участков МГ – шаровых кранов (ШК) и задвижек¹.

Герметичность ЗА необходимо контролировать ввиду постоянно происходящего износа как уплотнительных седел шарового крана, так и запорного элемента [1–4]. Износ происходит под действием силы трения, возникающей в пятнах контакта между поверхностью запорного элемента и уплотнительного седла. Также под влиянием транспортируемой среды повреждаются шлифованные поверхности запорного шара. Это связано с тем, что по ГОСТ 5542-2014 в природном газе допускается некоторая концентрация механических примесей².

При нарушении герметичности ШК или задвижки газ продолжает перетекать по затвору из одной отсекаемой части газопровода в другую – данное явление обозначается термином «переток». Помимо перетока, газ может уходить также через уплотнения шпинделя ЗА. В этом случае утечка газа происходит в окружающую среду, что при больших масштабах утечки приводит к образованию скоплений газа вокруг трубопровода, что является ЧС и требует немедленного выезда аварийной бригады для ликвидации течи.

Принятие мер по устранению неисправностей, вызывающих утечки газа (набивка уплотнительной пасты в затвор ШК, замена запорной арматуры), имеет смысл, если предварительно была проведена количественная оценка утечки газа через запорную арматуру, отражающая ее величину (объем). Это связано с тем, что в зависимости от диаметра и класса герметичности ЗА для нее устанавливается определенный допустимый объем утечек. Критерии оценки работоспособности ЗА, в том числе ее герметичности, регламентируются стандартом для трубопроводной арматуры ГОСТ 9544-2015³. Если при диагностике ШК или задвижки делается вывод о том, что для данного типа арматуры измеренный объем утечки не превышает установленный предел по герметичности, то меры по устранению течи принимать не требуется.

Акустическая эмиссия утечки

Переток газа через запорный орган шарового крана вызывает акустическую эмиссию утечки (АЭУ). В соответствии с ГОСТ Р 55045-2012 акустическая эмиссия утечки – это акустическая эмиссия (АЭ), вызванная гидродинамическими или аэродинамическими явлениями при протекании жидкости или газа через сквозную несплошность объекта⁴.

Акустические волны возникают вследствие увеличения скорости истечения воздушного потока через щель утечки ЗА. Отсутствие противодавления при движении газа по каналу утечки многократно увеличивает скорость потока, что в свою очередь приводит к изменению характера движения струи

¹ ГОСТ 24856–2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения.

² ГОСТ 5542–2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.

³ ГОСТ 9544–2015. Арматура трубопроводная. Нормы герметичности затворов.

⁴ ГОСТ Р 55045–2012. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения.

газа с ламинарного на турбулентный. Турбулентное движение газа сопровождается образованием вихрей и пульсаций потока, которые при контакте с металлом вызывают в нем вибрацию, которая и производит акустический сигнал.

АЭУ как физическая величина может быть зарегистрирована и преобразована в электрический сигнал для дальнейшей обработки и получения информации о степени утечки газа.

Таким образом, количественная оценка утечки может быть проведена путем измерения величины расхода газа с помощью акустико-эмиссионного контроля, который подразумевает регистрацию и анализ виброакустического сигнала, производимого потоком газа, истекающим через негерметичный ШК или задвижку.

Измерение спектра сигнала акустической эмиссии утечки

Турбулентный поток газа, возникающий в результате утечки через негерметичную ЗА, обуславливает появление звуковых сигналов в диапазоне частот 500–10 000 Гц и ультразвуковых сигналов в диапазоне частот 10...100 кГц [5].

Величина частотного диапазона сигнала АЭУ обратно пропорциональна размеру щели, через которую происходит утечка, и поэтому микроутечки обуславливают ультразвуковой диапазон сигнала АЭУ, а обычные утечки – звуковой диапазон. Экспериментально установлено, что утечки, представляющие реальную потерю газа, создают виброакустический сигнал в частотном диапазоне до 10 кГц. Более высокий частотный диапазон, от 10 до 100 кГц, может быть использован для диагностирования запорной арматуры на ранней стадии возникновения дефекта [5].

Преобразование сигнала АЭ в электрический сигнал, параметры которого используются для количественной и качественной оценки источника АЭ, осуществляется с помощью преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ). ПАЭ является важнейшим элементом прибора (системы) акустико-эмиссионного контроля. В зависимости от специфики задачи, параметров контролируемого объекта, типа источника АЭ, на практике могут применяться различные разновидности ПАЭ – конденсаторные, преобразователи на основе лазерных интерферометров, а также преобразователи, использующие пьезоэлектрические активные элементы [6].

Для диагностирования запорной арматуры трубопроводов применяются преимущественно пьезоэлектрические преобразователи. Основным элементом пьезоэлектрического ПАЭ является пьезоэлемент (пьезоэлектрический кристалл), преобразующий механическую вибрацию в электрический сигнал. Пьезоэлемент помещается в металлический корпус с плоским диэлектрическим доньшком и разъемом для выходного сигнала. При возникновении механической вибрации на поверхности, с которой контактирует датчик, он преобразует ее в электрический сигнал. Этот сигнал должен поступать на расположенный поблизости предварительный усилитель, после чего попадать на основную регистрирующую и обрабатывающую аппаратуру.

Стенд состоит из воздушного компрессора и пневматического ресивера модели Р5-125. На выходе ресивера установлен игольчатый клапан с отводом для регулирования расхода воздуха через клапан в атмосферу (имитация утечки).



Рис. 1. Стенд для имитации перетока

Для регистрации и измерения параметров сигнала АЭУ было собрано устройство, структурная схема которого представлена на рис. 2.

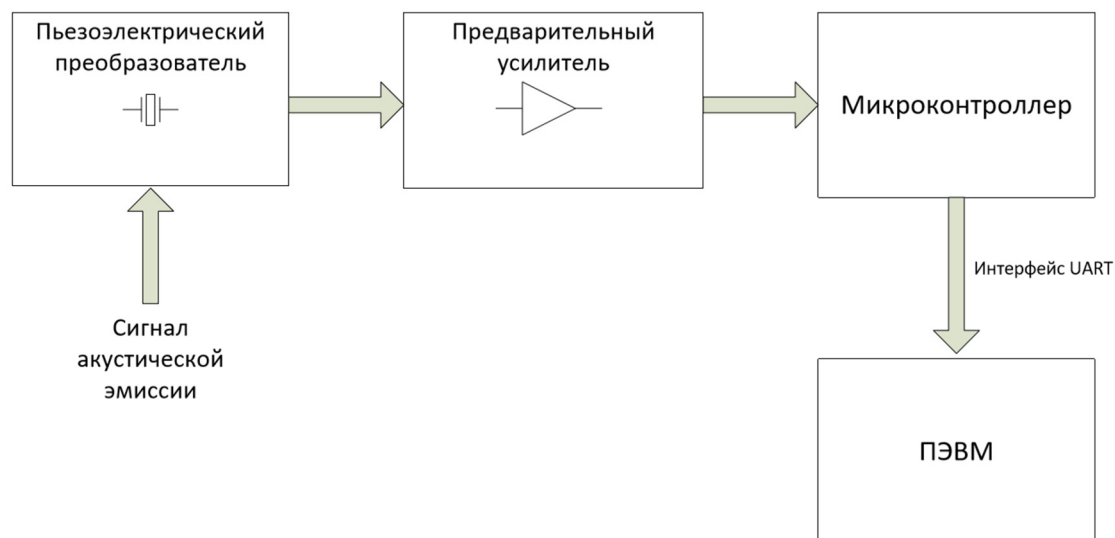


Рис. 2. Структурная схема устройства для регистрации и обработки сигнала АЭУ

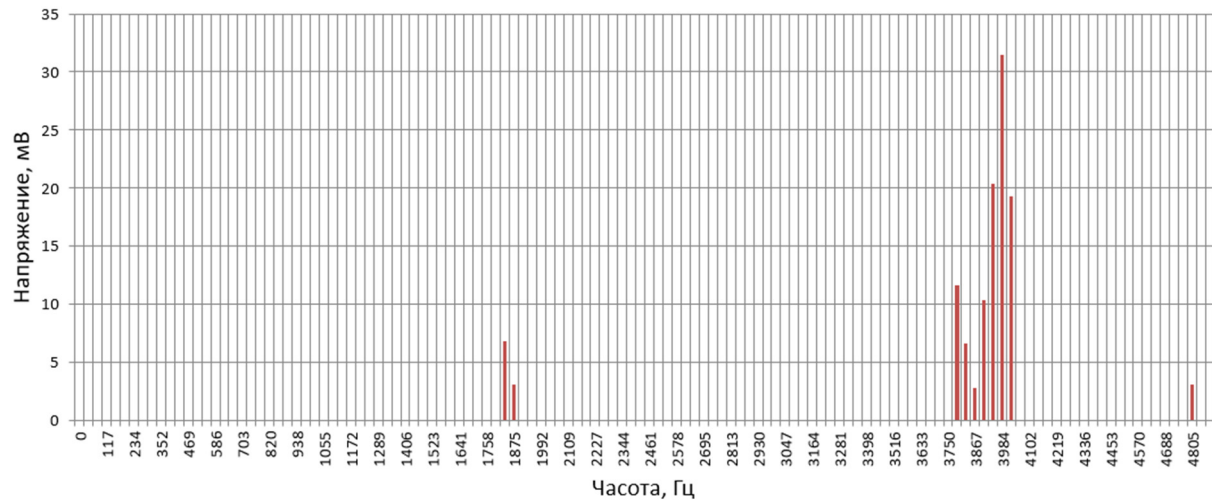
Устройство для регистрации и обработки сигнала АЭУ состоит из пьезоэлектрического датчика АЭ, двухкаскадного предварительного усилителя, выполненного на микросхеме операционного усилителя TL072, и микроконтроллера STM32F103C8T6. Микроконтроллер предназначен для регистрации, аналого-цифрового преобразования, фильтрации от помех сигнала АЭУ, а также его преобразования в частотный спектр и вывода полученной информации на ПЭВМ по интерфейсу UART через преобразователь интерфейсов UART-USB.

Разложение сигнала АЭУ на частотный спектр производится с помощью математического алгоритма быстрых преобразований Фурье (БПФ). Алгоритм БПФ применяется для анализа сигналов и предназначен для преобразования данных об измеренном сигнале из временной области в частотную, разлагая их на составляющие. Алгоритм БПФ позволяет сформировать массив данных, отражающий акустический спектр частот принимаемого сигнала утечки, который затем можно использовать для спектрального анализа сигнала. Входными данными для алгоритма БПФ служат частота дискретизации сигнала, количество измерений сигнала за одну итерацию и массив величин напряжений сигнала, измеренных через промежуток времени, равный выбранному периоду дискретизации. Для измерений использовались следующие параметры обработки сигнала АЭУ: частота дискретизации: 10 кГц; количество измерений сигнала за одну итерацию: 256. С учетом выбранной частоты дискретизации, согласно теореме Котельникова, максимальная частота оцифровываемого сигнала АЭУ составляет 5 кГц. Все измерения сигналов АЭУ проводились в диапазоне до 5 кГц.

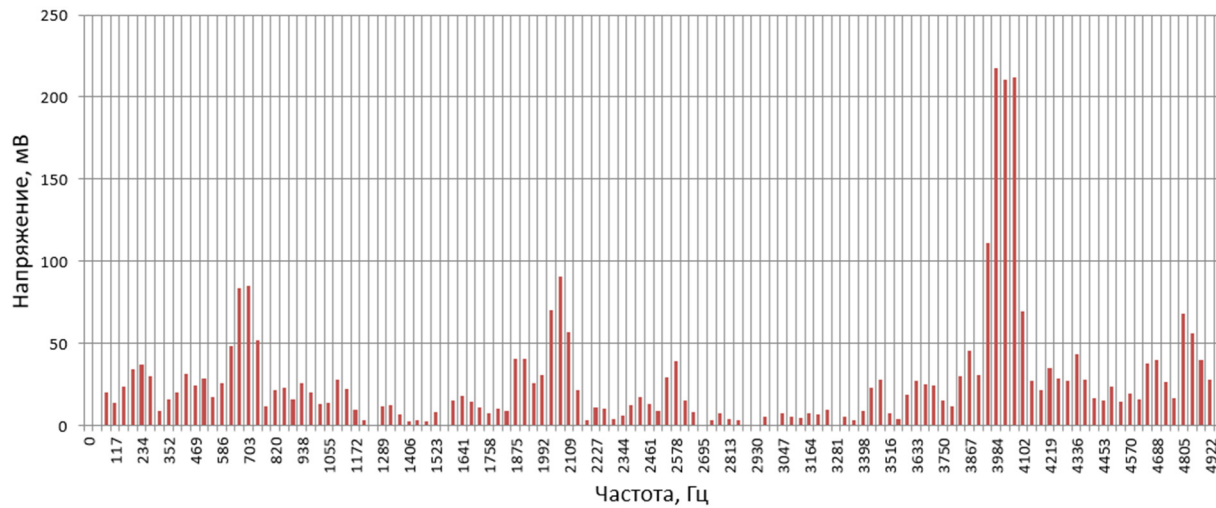
Измерения параметров сигнала АЭУ на лабораторном стенде проводились следующим образом:

- 1) на пневматический ресивер модели P5-125 устанавливается датчик преобразователя акустической эмиссии;
- 2) в ресивер подается воздух от компрессора под давлением не более 0,8 МПа;
- 3) фиксируются начальные показания амплитуды сигнала при отсутствии утечки для калибровки нижнего порога уровня шумов;
- 4) путем постепенного отворачивания регулирующей иглы из седла запорного дросселя устанавливается требуемый расход воздуха через дроссель в атмосферу (объем имитируемой утечки);
- 5) фиксируется спектр сигнала АЭУ.

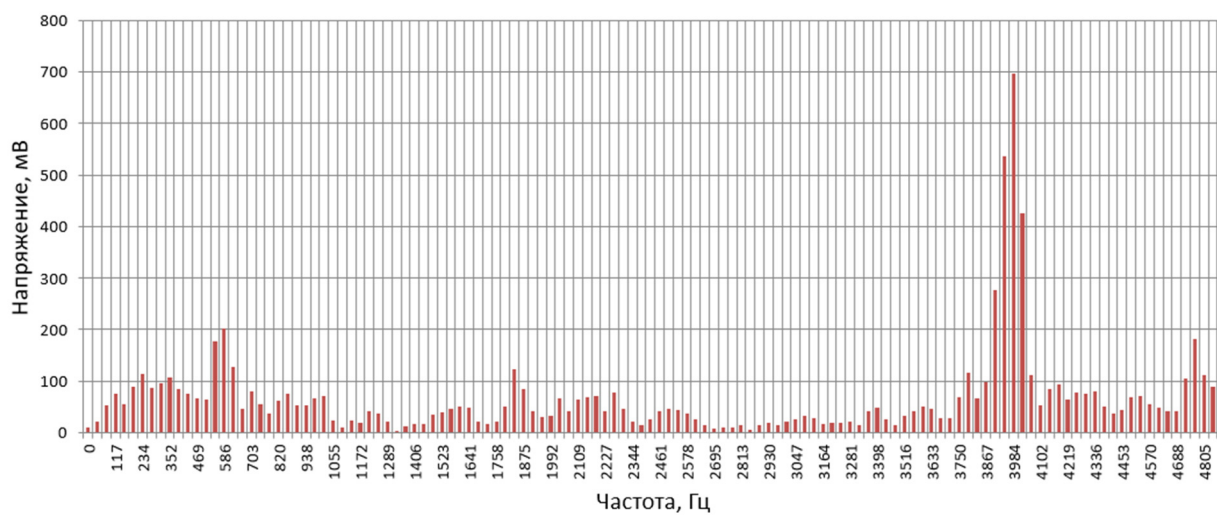
Измерения сигнала АЭУ на рассматриваемом стенде проводились при трех степенях утечки, ее величина регулировалась путем постепенного отворачивания регулирующей иглы запорного клапана. Спектр сигнала АЭУ при минимальном, среднем и максимальном откручивании иглы представлен на рис. 3.



а)



б)



в)

Рис. 3. Спектр сигнала АЭУ:

а – при минимальном откручивании иглы; б – среднем откручивании иглы;

в – максимальном откручивании иглы

Из спектрограмм видно, что при всех трех степенях утечки в частотном спектре сигнала АЭУ преобладающей является узкая полоса частот в диапазоне от 3750 до 4100 Гц. При увеличении степени утечки путем откручивания иглы запорного клапана амплитуды частот в этой полосе пропорционально возрастают. При изменении величины утечки в спектре могут проявляться дополнительные полосы частот в диапазонах 550–800 Гц и 1800–2200 Гц, амплитуды частот в которых также возрастают при увеличении объема утечки, что отображено на рис. 3, б, в. Однако полоса 3750–4100 Гц присутствует в спектре сигнала АЭУ вне зависимости от объема утечки.

Из этого можно сделать вывод, что для обнаружения утечки в крановом узле и определения ее величины необходимо зарегистрировать сигнал АЭУ и перевести его из временной области в частотную, после чего проанализировать полученный частотный спектр.

Для каждого конкретного ШК или задвижки, в зависимости от диаметра и класса герметичности, возможно экспериментально определить искомую полосу частот и порог по амплитуде сигнала АЭУ, который должен соответствовать предельному допустимому объему утечек газа для рассматриваемого образца запорной арматуры. При проведении диагностики ЗА акустико-эмиссионным контролем и обнаружении сигнала АЭУ, амплитуда которого превышает установленный порог сигнала АЭУ в заданной полосе частот, можно заключить, что допустимый для данного образца запорной арматуры объем утечек превышен и есть нужда в техническом обслуживании [7].

Заключение

Таким образом, в статье описано применение акустико-эмиссионного контроля для определения степени герметичности ЗА путем анализа частотного спектра сигнала акустической эмиссии утечки газа. Был исследован спектр сигнала АЭУ, полученного на лабораторном стенде для имитации перетока, приведена структурная схема устройства для регистрации, преобразования и анализа сигнала АЭУ. Приведены спектрограммы исследуемых сигналов АЭУ, снятых со стенда, определены преобладающие частоты и их амплитуды, указано на пропорциональную зависимость амплитуды сигнала АЭУ от объема утечки. Сделано заключение о том, как по снятым параметрам сигнала АЭУ определить наличие или отсутствие нарушения герметичности ШК или задвижки. Приведенные результаты позволяют использовать их в практической реализации способов технической диагностики запорной арматуры для обнаружения превышения допустимого объема утечек в ЗА. Своевременное обнаружение утечек газа через негерметичную ЗА позволяет вовремя провести техническое обслуживание и сохранить оборудование в исправном состоянии, тем самым избежать серьезных экономических и экологических последствий.

Список литературы

1. Юрков Н. К., Затылкин А. В., Полесский С. Н. [и др.]. Методы повышения точности прогнозирования показателей надежности наукоемких сложных электронных систем // Современные информационные технологии. 2014. № 19. С. 183–187. EDN: SLSGFL
2. Yurkov N. K., Trusov V. A., Lysenko A. V. Methods of Providing Reliability of Avionics and Aerospace Equipment at the Design Stage // 13th international scientific and technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2016) : proceedings : in 12 volumes (Novosibirsk, 3–6 October 2016). Novosibirsk : Novosibirsk State Technical University, 2016. Vol. 1, part 2. P. 123–127. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806427 EDN: WZWMUD
3. Grishko A., Lysenko A., Yurkov N. [et al.]. Stochastic Model of Parametric Prediction of Reliability of Radio-Electronic Systems // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT 2019) : proceedings (Yekaterinburg, 25–26 April 2019). Yekaterinburg : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. P. 432–435. doi: 10.1109/USBEREIT.2019.8736570 EDN: MUDDKI
4. Голушко Д. А., Лысенко А. В., Калаев М. П. Цифровой генератор прямого синтеза для формирования многоканального испытательного сигнала с плавающей частотой // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4. С. 73–78. EDN: VMIZDP
5. Короленок А. М., Тухбатуллин Ф. Г., Колотилов Ю. В. Обеспечение промышленной безопасности компрессорных станций путем диагностики негерметичности запорной арматуры // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 5. С. 68–71.
6. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов. РД 03-300-99 : утвержден постановлением Госгортехнадзора России от 15 июля 1999 г. № 53 : дата введения 1999-01-10. М. : ПИО ОБТ, 2002. 33 с.
7. Штыков Р. А., Юрков Н. К. Оптимизация управления транспортировкой газа по трубопроводам путем анализа динамики изменения концентрации примесей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 87–92. doi: 10.21685/2307-4205-2021-3-11

References

1. Yurkov N.K., Zatylnik A.V., Polesskiy S.N. et al. Methods for improving the accuracy of forecasting reliability indicators of high-tech complex electronic systems. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2014;(19):183–187. (In Russ.). EDN: SLSGFL
2. Yurkov N.K., Trusov V.A., Lysenko A.V. Methods of Providing Reliability of Avionics and Aerospace Equipment at the Design Stage. *13th international scientific technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2016): proceedings: in 12 volumes (Novosibirsk, 3–6 October 2016)*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016;1(Pt.2):123–127. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806427 EDN: WZWMUD
3. Grishko A., Lysenko A., Yurkov N. et al. Stochastic Model of Parametric Prediction of Reliability of Radio-Electronic Systems. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT 2019): proceedings (Yekaterinburg, 25–26 April 2019)*. Yekaterinburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019:432–435. doi: 10.1109/USBEREIT.2019.8736570 EDN: MUDDKI
4. Golushko D.A., Lysenko A.V., Kalaev M.P. Digital direct synthesis generator for the formation of a multichannel test signal with a floating frequency. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(4):73–78. (In Russ.). EDN: VMIZDP
5. Korolenok A.M., Tukhatullin F.G., Kolotilov Yu.V. Ensuring industrial safety of compressor stations by diagnosing leakage of shut-off valves. *Territoriya «NEFTEGAZ» = The territory of NEFTEGAZ*. 2015;(5):68–71. (In Russ.)
6. Requirements for acoustic emission transducers used for monitoring hazardous production facilities. *RD 03-300-99: utverzhden postanovleniem Gosortekhnadzora Rossii ot 15 iyulya 1999 g. № 53: data vvedeniya 1999-01-10 = RD 03-300-99: approved by Resolution No. 53 of Gosortekhnadzor of Russia dated July 15, 1999: date of introduction 1999-01-10*. Moscow: PIO OBT, 2002:33. (In Russ.)
7. Shtykov R.A., Yurkov N.K. Optimization of gas transportation control through pipelines by analyzing the dynamics of changes in the concentration of impurities. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):87–92. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-3-11

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Сергеевич Бояркин

техник-конструктор,
Научно-производственное
предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: boyarkyndmytry@gmail.com

Виктор Дмитриевич Ежижанский

инженер,
Научно-производственное
предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: vityastalkerxdxd@gmail.com

Дмитрий Александрович Голушко

кандидат технических наук, начальник отдела,
Научно-производственное
предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: dmitgolushko@yandex.ru

Александр Юрьевич Кирсанов

начальник отдела,
Научно-производственное
предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: malamash@yandex.ru

Dmitry S. Boyarkin

Technician designer,
Scientific and Production Enterprise "Rubin"
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Viktor D. Yezhizhansky

Engineer,
Scientific and Production Enterprise "Rubin"
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Dmitry A. Golushko

Candidate of technical sciences,
head of department,
Scientific and Production Enterprise "Rubin"
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Aleksandr Yu. Kirsanov

Head of department,
Scientific and Production Enterprise "Rubin"
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Алексей Владимирович Лысенко

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

Aleksey V. Lysenko

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 14.12.2024

Поступила после рецензирования/Revised 25.12.2024

Принята к публикации/Accepted 16.01.2025

НАДЕЖНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОЛЕТЯЩИХ ОБЪЕКТОВ ПЗС-СИСТЕМОЙ В МЕТЕОРНОЙ АСТРОНОМИИ

В. С. Жабин¹, А. К. Муртазов²

^{1,2} Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина, Рязань, Россия
¹ slavkaj@yandex.ru, ² akmurtazov@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена вероятность автоматической регистрации метеоров (срабатывание аппаратуры при пролете метеора в кадре) как показателя надежности регистрации быстропротекающих метеорных явлений. *Материалы и методы.* Проанализированы характеристики ПЗС-камер, установлены границы линейности фотометрических измерений блеска метеоров на единичных фреймах. *Результаты и выводы.* Приведены результаты оценки вероятности регистрации быстролетающих метеоров потока Персеиды ПЗС-системой для различных порогов регистрации. Вероятность регистрации достигает единицы, начиная с линейной части фотометрической кривой от приблизительно второй звездной величины и ярче, и резко уменьшается при приближении к порогу регистрации.

Ключевые слова: метеоры, ПЗС-камера, вероятность регистрации

Для цитирования: Жабин В. С., Муртазов А. К. Надежность регистрации быстролетающих объектов ПЗС-системой в метеорной астрономии // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 103–108. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-13

RELIABILITY OF FAST-MOVING OBJECTS RECORDING BY CCD-SYSTEM IN METEOR ASTRONOMY

V.S. Zhabin¹, A.K. Murtazov²

^{1,2} Ryazan State University named after S.A. Yesenin, Ryazan, Russia
¹ slavkaj@yandex.ru, ² akmurtazov@gmail.com

Abstract. *Background.* The probability of meteor automatic recording (facility response to the meteor appearance in the frame) as an indication of fast-moving meteor phenomena recording reliability is considered. *Materials and methods.* CCD cameras' characteristics are analyzed, as well as linearity borders of meteor magnitude photometric measurements are found. *Results and conclusions.* The results of assessing the probability of fast-moving Perseids meteors recording by the CCD system for different recording thresholds are presented. The recording probability comes up to 1 starting from the photometric curve linear part (approximately 2^m) and sharply reduces when coming up to the recording threshold.

Keywords: meteors, CCD-camera, detection probability

For citation: Zhabin V.S., Murtazov A.K. Reliability of fast-moving objects recording by CCD-system in meteor astronomy. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(1):103–108. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-13

Введение

Наблюдения метеорных явлений – явлений сгорания частичек космической пыли различного происхождения в атмосфере – являются массовыми и достаточно широко распространенными. Регистрация таких событий производится различными методами, но наиболее удобным является их регистрация ПЗС-камерами (сокр. от «прибор с зарядовой связью»). Соответствующее программное обеспечение позволяет вырезать метеорные события из непрерывного видеопотока, сохраняя их для последующей обработки.

Метеорные явления являются быстропротекающим процессом. При геоцентрической скорости движения метеороидов до ≈ 72 км/с угловая скорость их движения на небесной сфере весьма высока. Например, геоцентрическая скорость частиц в наиболее известном метеорном потоке Персеиды составляет ≈ 60 км/с. На небесной сфере это соответствует 27 град/с, что предполагает определенные требования к системе обнаружения и регистрации метеоров.

В конечном счете вероятность обнаружения и регистрации метеоров (срабатывание аппаратуры при пролете метеора в кадре) является показателем надежности регистрации метеорных явлений.

В целом проблема надежной регистрации быстролетающих объектов актуальна и находится в поле зрения специалистов в различных ее проявлениях [1–3].

Фотометрические характеристики метеорной камеры

Для мониторинга метеорных явлений наиболее распространенной в мире является 1/2" ПЗС-камера *Watec-902H* на базе матрицы *ICX-249AL ExView* компании *Sony* с размером пиксела 8.6 мкм (Г) x 8.3 мкм (В), чересстрочной разверткой и разрешением в телевизионном режиме 570 ТВЛ при освещенностях до 0,0001 лк [4–7]. Объективы различных фирм для 1/2" матриц создают изображения звезд как точечных объектов по критерию Найквиста не менее 3 пиксел поперек их полуширины [4, 5].

В отличие от различных систем усиления изображения (ЭОПов) для регистрации слабых объектов эти камеры не дают возможности регистрировать слабые метеоры с коротким следом, однако способны получать большие ряды наблюдений метеоров яркого и «среднего» блеска [8].

Для регистрации метеоров используется специально разработанное компьютерное обеспечение, позволяющее захватывать и сохранять кадры с метеорами, проводить обработку полученных изображений и далее определять координаты метеорных следов на небесной сфере, радианты метеорных потоков, траектории их полета над Землей, в конечном счете – орбиты метеороидов в Солнечной системе. Авторы регистрировали метеоры, используя программное обеспечение *UFO Capture* фирмы *Sonotaco* (http://sonotaco.com/soft/e_index.html).

При угловой скорости метеора 24° c^{-1} он будет зарегистрирован на одном кадре или двух фреймах. В оптической системе с 0,5" ПЗС и 8-мм объективом метеор будет зафиксирован ~ на 8 пикселах (рис. 1).

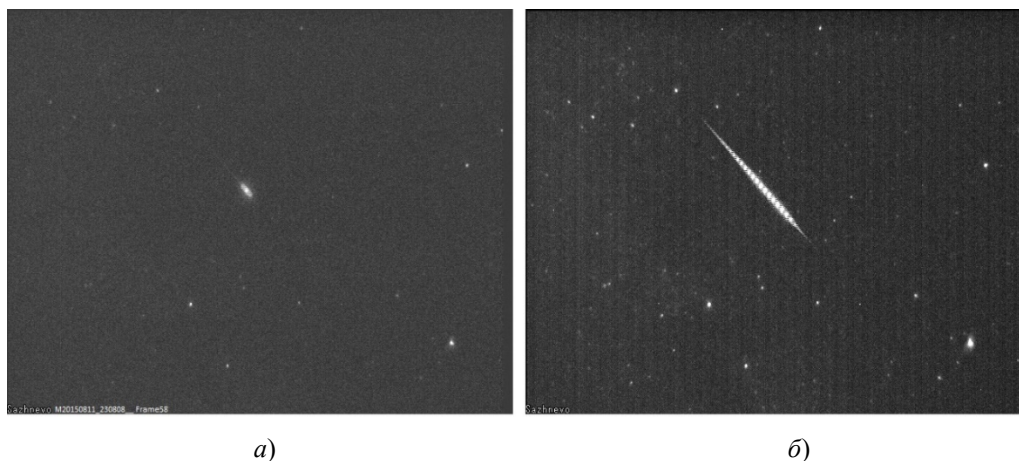


Рис. 1. Фиксация метеора: а – изображение метеора на одном фрейме; б – сложенное изображение этого метеора

На рис. 2 приведены результаты фотометрии неподвижных звезд на одном фрейме (усредненные измерения по 24 полукадрам) длительностью 0,02 с в программном софте *IRIS* [9] с круговой диафрагмой. Учитывались плоское поле, темновой ток и ток считывания. Фреймы получены покадровым разложением *avi*-файла, записанного *Wat-902H* с объективом *Computar HG0808AFCS* (поле зрения системы $45^\circ \times 34^\circ$).

Здесь представлено соотношение между звездной величиной неподвижных звезд (звездная величина уменьшается с увеличением их блеска) и их яркостью на изображении в виде отношения яркости звезды по отношению к окружающему фону (отношение «сигнал-шум»). Звездная величина в астрономии определяется из формулы Погсона как

$$\Delta m = -2,5 \lg \frac{S}{N}, \quad (1)$$

а то же отношение яркости объекта и фона (шума) на ПЗС-кадре как отношение

$$\Delta J = 20 \lg \frac{S}{N}. \quad (2)$$

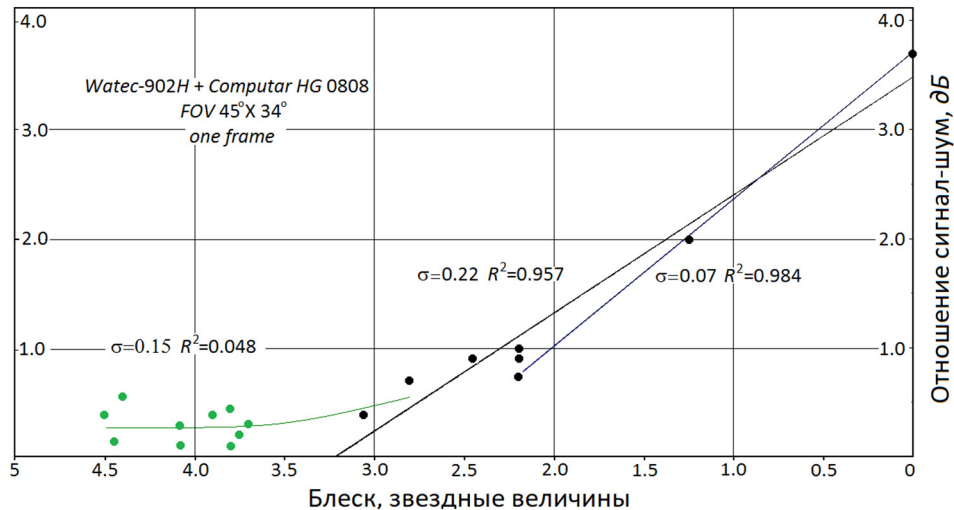


Рис. 2. Соотношение между блеском звезд и их яркостью на изображении

Анализ показывает, что для единичных фреймов яркость объектов слабее 3,5 звездной величины не зависит от блеска звезд. Она резко изменяется при переходе от фрейма к фрейму и создает сильный эффект мерцания слабых звезд. Линейная зависимость «яркость – звездная величина» появляется, начиная со второй звездной величины и ярче [10]. Поскольку рабочий диапазон камеры *Wat-902H*, заявленный производителем, составляет 50 дБ, линейность должна сохраняться, по крайней мере до звездной величины $\sim 4^m - 5^m$, которую имеют планеты и болиды.

Оценка вероятности регистрации метеорных явлений

При регистрации пролета метеора ввиду отсутствия данных о используемом в программе UFO алгоритме можно воспользоваться рядом упрощений и связать задачу оценки вероятности регистрации метеора с параметрами, которые возможно определить из наблюдений: относительный порог срабатывания и звездная величина обнаруживаемого объекта.

При решении задачи обнаружения подвижных объектов могут иметь место ошибки двух родов [11].

Ложная тревога – принятие автоматическим устройством ошибочного решения о наличии сигнала об изменениях в содержании кадра, когда такой сигнал отсутствует.

Пропуск сигнала возникает в том случае, если в результате взаимодействия сигнала с шумом на входе порогового устройства суммарное напряжение окажется меньше напряжения порога U_0 :

$$|S_i + N_i| \leq U_0. \quad (3)$$

Это соотношение применимо к нашему случаю пропуска регистрации быстрого объекта.

В нашем случае порогом срабатывания можно считать некое соотношение $h = \frac{S_0}{N_0}$, которое определяется из результатов мониторинга.

По критерию Неймана – Пирсона оптимальным решением считается такое, которое обеспечивает максимум вероятности правильного обнаружения P_D (или, что то же самое, минимум вероятности пропуска сигнала) при заданной вероятности ложной тревоги P_F . Решающее правило отличается только значением порога.

Считая, что шум на входе приемного устройства имеет нормальное распределение, характеристики обнаружения можно получить из, например, следующих уравнений [12]:

$$P_F = 1 - \Phi \left(\frac{h}{\sqrt{\frac{2S}{N}}} \right), \quad (4)$$

$$P_D = 1 - \Phi \left(\frac{h}{\sqrt{\frac{2S}{N}}} - \sqrt{\frac{2S}{N}} \right), \quad (5)$$

где $\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2} dt$ – интеграл вероятности.

На вероятность правильного обнаружения влияет скорость объекта наблюдения. В случае быстрых перемещений изображения наблюдаемого объекта фактическое время накопления, определяющее величину сигнала от движущегося объекта, уменьшается пропорционально скорости перемещения его изображения на матрице, что уменьшает отношение «сигнал–шум» и понижает вероятность регистрации быстрого объекта по сравнению с более медленным [11].

Авторами при проведении ПЗС-наблюдений метеорного потока Персеиды визуально регистрировался пролет метеора на экране монитора. Эти регистрации сравнивались с зарегистрированными программой UFO метеорами. Проведенные эксперименты позволили оценить вероятность регистрации метеоров различного блеска и скорости от величины порога срабатывания системы регистрации UFO. Порог срабатывания H устанавливался здесь вручную в зависимости от уровня фона неба на мониторе [13, 14].

На рис. 3 приведены результаты оценки вероятности регистрации быстролетающих метеоров потока Персеиды ($v \approx 60$ км/с) ПЗС-системой для различных порогов регистрации (срабатывания H). Вероятность регистрации достигает высоких значений начиная с линейной части фотометрической кривой ПЗС-камеры от приблизительно второй звездной величины и ярче и резко уменьшается при приближении к порогу регистрации. При высоком пороге регистрации система достаточно надежно регистрирует наиболее яркие объекты, сравнимые с ярчайшими звездами.

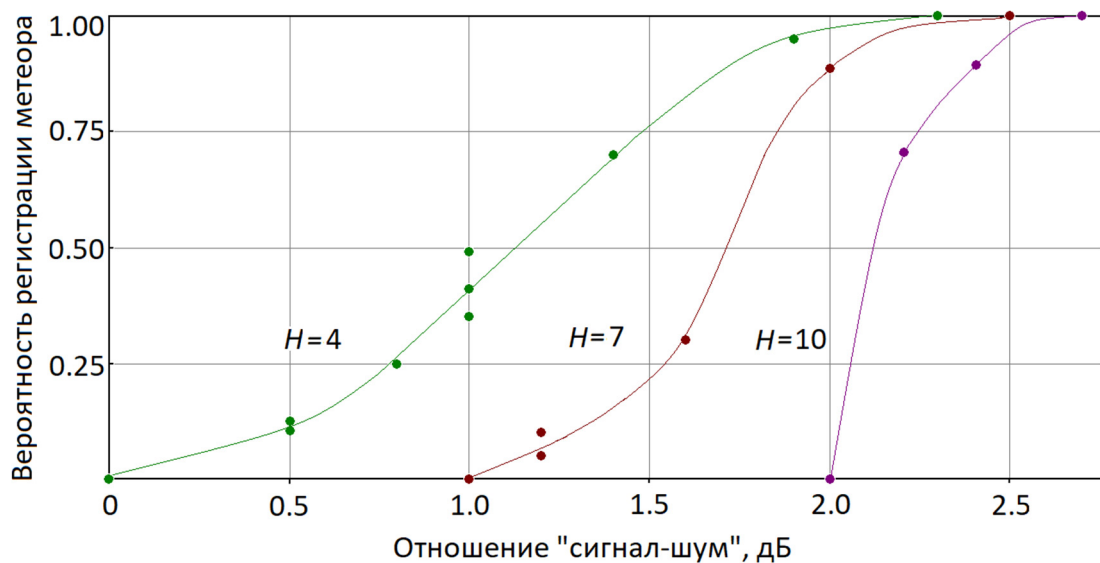


Рис. 3. Вероятность обнаружения метеора на одном фрейме при различных порогах срабатывания

Заключение

Вероятность обнаружения и регистрации метеоров (срабатывание аппаратуры при пролете метеора в кадре) является показателем надежности регистрации метеорных явлений.

Линейность фотометрической характеристики оптико-электронной системы на базе камеры *Watec-902H* и 8-мм объектива *HG0808* начинается со второй звездной величины (≈ 1 дБ) при регистрации метеора на одном фрейме. Вероятность регистрации объекта в этой области может достигать высоких значений при правильном выборе порога регистрации системы, который зависит от условий наблюдений и фона неба. В общем, повышение порога регистрации снижает вероятность регистрации слабых объектов и сужает область обнаружения быстродвижущихся метеоров.

Список литературы

1. Миронов В. В. Сравнение систем регистраций космического мусора // Космические исследования. 1996. Т. 34, № 4. С. 414–419.
2. Миронов В. В. Методика оценки плотности космического мусора по данным бортовых регистрирующих систем // Космические исследования. 2003. Т. 41, № 2. С. 220–224.
3. Миронов В. В., Мухин А. В. Системный анализ столкновений мелкого космического мусора с космическим аппаратом // Труды ИСА РАН. Динамика неоднородных систем. 2008. Т. 32, № 2. С. 320–325.
4. Миронов В. В., Муртазов А. К., Усовик И. В. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства : монография. Рязань : Изд. Коняхин А.В. (Book Jet), 2018. 312 с.
5. Миронов В. В., Муртазов А. К. Ретроспектива проблемы космического мусора. Ч. 2. Мониторинг космического мусора естественного происхождения в околоземном пространстве методами метеорной астрономии // Космические исследования. 2021. Т. 59, № 1. С. 51–62. doi: 10.31857/S0023420621010064
6. Муртазов А. К. Мониторинг загрязнений околоземного пространства оптическими средствами. Рязань : РГУ имени С. А. Есенина, 2010. 252 с. doi: 10.13140/RG.2.1.3644.0721
7. Jenniskens P., Gural P. S., Dynneson L. [et al.]. CAMS: Cameras for All-sky Meteor Surveillance to establish minor meteor showers // Icarus. 2011. Vol. 216. P. 40–61. doi: 10.1016/j.icarus.2011.08.012
8. Koseki M., Ueda M., Shigeno Y. What is the difference between image intensifier and CCD meteors? III. How do meteor showers look like by image intensifiers and by CCD? // WGN. 2010. Vol. 38, iss. 5. P. 145–160.
9. Buil C. IRIS. Astronomical image processing software. 2010. URL: <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>
10. Murtazov A. K., Efimov A. V. Measurements of CCD optical linearity for magnitude determination during meteor observations // Proceedings of International Meteor Conference (Egmond, the Netherlands, June 2–5. 2016). 2016. P. 202–204. URL: <http://adsabs.harvard.edu – publication code 2016pimo.conf>
11. Андреев А. Л., Бурдова Н. А., Коротаев В. В. Алгоритм пространственно-временной селекции сигналов в адаптивных системах наблюдения за подвижными объектами // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 4. С. 13–17.
12. Болденков Е. Н. Обнаружение сигнала: алгоритмы обнаружения, статистические характеристики обнаружения. М. : МЭИ, 2014.
13. Бойкова Т. В., Григорьев А. С., Маколкин Д. В. [и др.]. Качество и надежность энергосистем малой мощности // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 28–37.
14. Бояркин Д. С., Асеев Е. А., Голушко Д. А. [и др.]. Протокол регистрации технического обслуживания трубопроводной арматуры // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 95–102.

References

1. Mironov V.V. Comparison of space debris registration systems. *Kosmicheskie issledovaniya = Space research*. 1996;34(4):414–419. (In Russ.)
2. Mironov V.V. Methodology for estimating the density of space debris based on data from on-board recording systems. *Kosmicheskie issledovaniya = Space Research*. 2003;41(2):220–224. (In Russ.)
3. Mironov V.V., Mukhin A.V. System analysis of collisions of small space debris with a spacecraft. *Trudy ISA RAN. Dinamika neodnorodnykh system = Proceedings of the ISA RAS. Dynamics of heterogeneous systems*. 2008;32(2):320–325. (In Russ.)
4. Mironov V.V., Murtazov A.K., Usovik I.V. *Sistemnye metody monitoringa okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva: monografiya = System methods of monitoring near-Earth space : monograph*. Ryazan': Izd. Konyakhin A.V. (Book Jet), 2018:312. (In Russ.)
5. Mironov V.V., Murtazov A.K. A retrospective of the problem of space debris. Part 2. Monitoring of natural space debris in near-Earth space by methods of meteor astronomy. *Kosmicheskie issledovaniya = Space Research*. 2021;59(1):51–62. (In Russ.). doi: 10.31857/S0023420621010064
6. Murtazov A.K. *Monitoring zagryazneniy okolozemnogo prostranstva opticheskimi sredstvami = Monitoring of near-Earth space pollution by optical means*. Ryazan': RGU imeni S.A. Esenina, 2010:252. (In Russ.). doi: 10.13140/RG.2.1.3644.0721
7. Jenniskens P., Gural P.S., Dynneson L. et al. CAMS: Cameras for All-sky Meteor Surveillance to establish minor meteor showers. *Icarus*. 2011;216:40–61. doi: 10.1016/j.icarus.2011.08.012
8. Koseki M., Ueda M., Shigeno Y. What is the difference between image intensifier and CCD meteors? III. How do meteor showers look like by image intensifiers and by CCD? *WGN*. 2010;38(5):145–160.
9. Buil C. *IRIS. Astronomical image processing software*. 2010. Available at: <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>
10. Murtazov A.K., Efimov A.V. Measurements of CCD optical linearity for magnitude determination during meteor observations. *Proceedings of International Meteor Conference (Egmond, the Netherlands, June 2–5. 2016)*. 2016:202–204. Available at: <http://adsabs.harvard.edu – publication code 2016pimo.conf>

11. Andreev A.L., Burdova N.A., Korotaev V.V. Algorithm of spatial and temporal selection of signals in adaptive systems for monitoring mobile objects. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* = *Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2011;(4):13–17. (In Russ.)
12. Boldenkov E.N. *Obnaruzhenie signala: algoritmy obnaruzheniya, statisticheskie kharakteristiki obnaruzheniya* = *Signal detection: detection algorithms, statistical characteristics of detection*. Moscow: MEI, 2014. (In Russ.)
13. Boykova T.V., Grigor'ev A.S., Makolkin D.V. et al. Quality and reliability of low-power power systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):28–37. (In Russ.)
14. Boyarkin D.S., Aseev E.A., Golushko D.A. et al. Protocol of registration of maintenance of pipeline fittings. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):95–102. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Вячеслав Сергеевич Жабин

аспирант,
сотрудник астрономической обсерватории,
Рязанский государственный университет
имени С. А. Есенина
(Россия, г. Рязань, ул. Свободы, 46)
E-mail: slavkaj@yandex.ru

Vyacheslav S. Zhabin

Postgraduate student,
researcher of the Astronomical Observatory,
Ryazan State University named after S.A. Yesenin
(46 Svobody street, Ryazan, Russia)

Андрей Константинович Муртазов

доктор технических наук, профессор,
директор астрономической обсерватории,
Рязанский государственный университет
имени С. А. Есенина
(Россия, г. Рязань, ул. Свободы, 46)
E-mail: akmurtazov@gmail.com

Andrey K. Murtazov

Doctor of technical sciences, professor,
director of the Astronomical Observatory,
Ryazan State University named after S.A. Yesenin
(46 Svobody street, Ryazan, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 10.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 09.11.2024

Принята к публикации/Accepted 19.11.2024

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 519.718.2

doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-14

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ПУТЕМ МЕЗОДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. А. Барзов¹, А. С. Григорьев², Я. Д. Сеина³,
В. С. Пузаков⁴, А. Ж. Касенов⁵, Н. Н. Сафронова⁶

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

⁴ ООО «Бюро Энергетика», Раменское, Россия

⁵ Торайгыров университет, Павлодар, Республика Казахстан

⁶ Ассоциация организаций строительного комплекса атомной отрасли, Москва, Россия

¹ a.a.barzov@gmail.com, ² Grigoriev_AS@nrcki.ru, ³ yaseina@yandex.ru,

⁴ PuzakovVS@mail.ru, ⁵ asylbek_kasenov@mail.ru, ⁶ safronova_nn@accni.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Показано, что аппарат мезодиагностики позволяет решать задачи не только экспресс-оценки состояния материала и изделий с учетом их текущей поврежденности, но и осуществлять ресурсно-эксплуатационное прогнозирование изменений данного состояния. *Материалы и методы.* Предложена модель, связывающая в единый функциональный комплекс результаты мезодиагностирования поврежденности материала изделий с остаточным ресурсом их надежной эксплуатации. Основным информационно-физическим параметром модели является время осуществления операции мезодиагностирования, в течение которого диагностируемый материал достигает критического уровня поврежденности. В частности, аналитическим путем установлено, что проведение двух операций мезодиагностирования в различное время функционирования изделий позволяет однозначно судить о величине его остаточного ресурса. Отличительная особенность предлагаемой модели прогнозирования заключается в отсутствии в ее структуре абсолютных значений поврежденности изделий, например, материала их поверхностного слоя. Это обстоятельство подчеркивает общность и прикладное значение модели при решении соответствующих задач предиктивного анализа функционального качества различных материалов и изделий из них. Отмечено, что основной проблемой практической реализации предлагаемого подхода к эксплуатационно-ресурсному моделированию является выбор наиболее физически информативного метода мезодиагностирования поврежденности материала изделий. В качестве такого метода предложено использовать аппарат энергоэкстремальной гидроструйной диагностики, которая обладает широкими физико-технологическими возможностями идентификации параметров состояния, в том числе поврежденности материала поверхностного слоя различных изделий. *Результаты и выводы.* Намечены перспективы дальнейшего использования предлагаемого мезодиагностического подхода и полученной на его основе модели, а также других ее функциональных модификаций. В частности, отмечена реалистичность ускоренного определения эксплуатационно-технологических характеристик новых материалов путем разработки соответствующих инженерных методик.

Ключевые слова: прогнозирование, остаточный ресурс, мезодиагностика, гидроструйная диагностика, функциональная поверхность, эксплуатация

Для цитирования: Барзов А. А., Григорьев А. С., Сеина Я. Д., Пузаков В. С., Касенов А. Ж., Сафронова Н. Н. 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

A MODEL FOR PREDICTING THE RESOURCE PARAMETERS OF PRODUCTS BY MESO-DIAGNOSING THEIR FUNCTIONAL DAMAGE DURING OPERATION

A.A. Barzov¹, A.S. Grigoriev², Ya.D. Seina³, V.S. Puzakov⁴, A.Zh. Kasenov⁵, N.N. Safronova⁶

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁴ National Research University "MEI", Moscow, Russia

⁵ LLC "Bureau Energetika", Ramenskoye, Russia

⁶ Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

⁶ Association of Nuclear Industry Construction Organizations, Moscow, Russia

¹ a.a.barzov@gmail.com, ² Grigoriev_AS@nrcki.ru, ³ yaseina@yandex.ru,

⁴ PuzakovVS@mail.ru, ⁵ asylbek_kasenov@mail.ru, ⁶ safronova_nn@accni.ru

Abstract. Background. It is shown that the mesodiagnostic apparatus allows solving problems not only of express assessment of the condition of materials and products, taking into account their current damage, but also to carry out resource and operational forecasting of changes in this condition. **Materials and methods.** A model is proposed that combines the results of mesodiagnosis of damage to the material of products with the residual resource of their reliable operation into a single functional complex. The main information and physical parameter of the model is the time of the mesodiagnostic operation, during which the diagnosed material reaches a critical level of damage. In particular, it has been analytically established that carrying out two mesodiagnostic operations at different times of operation of products makes it possible to unambiguously judge the value of its residual life. A distinctive feature of the proposed forecasting model is the absence in its structure of absolute values of damage to products, for example, the material of their surface layer. This circumstance emphasizes the generality and practical importance of the model in solving the corresponding tasks of predictive analysis of the functional quality of various materials and products made from them. It is noted that the main problem of the practical implementation of the proposed approach to operational and resource modeling is the choice of the most physically informative method of mesodiagnosis of damage to the material of products. As such a method, it is proposed to use an apparatus for energy-extreme hydrojet diagnostics, which has wide physical and technological capabilities for identifying condition parameters, including damage to the material of the surface layer of various products. **Results and conclusions.** The prospects for further use of the proposed mesodiagnostic approach and the model obtained on its basis, as well as its other functional modifications, are outlined. In particular, the realism of accelerated determination of the operational and technological characteristics of new materials through the development of appropriate engineering techniques was noted.

Keywords: forecasting, residual resource, meso diagnostics, hydrojet diagnostics, functional surface, operation

For citation: Barzov A.A., Grigoriev A.S., Seina Ya.D., Puzakov V.S., Kasenov A.Zh., Safronova N.N. A model for predicting the resource parameters of products by meso-diagnosing their functional damage during operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):109–116. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-14

Введение

Задача прогнозирования остаточного ресурса надежной эксплуатации изделий ответственного назначения является весьма актуальной во многих отраслях современного промышленного производства. Существующие подходы к ее решению могут быть дополнены путем использования аппарата мезодиагностирования [1], занимающего промежуточное положение между методами неразрушающего контроля дефектности материалов [2–3] и их разрушающими испытаниями [4]. В связи с этим под мезодиагностикой будем понимать совокупность методов и средств получения исчерпывающей информации об исследуемом объекте анализа (АО) при координатно-локальном физико-энергетическом воздействии на него, которое обеспечивает критический уровень поврежденности изучаемого материала. Однако при этом происходит функционально значимое изменение параметров состояния изделия или его частей.

режимах эксплуатации и мезодиагностирования, а также исходя из геометрических соображений подобия, исходные соотношения, отражающие искомую функциональную зависимость, будут иметь вид

$$\frac{l_2}{l_1 + l_4} = \frac{l_3}{l_4}, \quad (1)$$

где l_1, l_2, l_3 и l_4 – соответственно длина отрезков с этими номерами позиций, как показано на рис. 1.

Или, учитывая очевидную связь длины данных отрезков с соответствующими кинетическими (временными) параметрами, представленными на рис. 1, из уравнения (1) получим

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_3} = \frac{\Delta t_2}{T_{\text{ост}}}, \quad (2)$$

где, исходя из обозначений, показанных на рис. 1, следуют соотношения

$$\Delta t_1 = t_{d1} - t_{s1}; \quad \Delta t_2 = t_{d2} - t_{s2}; \quad (3)$$

$$\Delta t_3 = t_{s2} - t_{s1}; \quad T_{\text{ост}} = t_p - t_{s2}.$$

Причем в соотношениях (2) и (3) под $T_{\text{ост}}$ и t_p понимается остаточный ресурс эксплуатации изделий и общая продолжительность его функционирования соответственно, например время до разрушения ОА в критическом состоянии.

После преобразования (2) с учетом соотношений (3) окончательно получим следующее выражение:

$$T_{\text{ост}} = \frac{1}{\Delta t_d - 1} \Delta t_3, \quad (4)$$

где $\overline{\Delta t_d} = \Delta t_{d1} / \Delta t_{d2}$ – относительное время изменения продолжительности операции мезодиагностирования.

Соотношение (4) представляет собой модель, позволяющую по результатам как минимум двух операций мезодиагностирования состояния материала ОА, проведенных в разное время его функционирования, аналитическим путем определить расчетные значения ожидаемой величины остаточного ресурса его надежной эксплуатации. Отличительная особенность (4) состоит в том, что оно не содержит в явном виде абсолютных значений поврежденности материала ОА. Это обеспечивает не только количественную конкретику процедуры прогнозирования, но и не является ограничением на априори неизвестный режим эксплуатации изделия, т.е. его переход из состояния, характеризуемого поврежденностью ω (1) в состояние с поврежденностью ω (см. рис. 1). Данное обстоятельство подчеркивает практическую полезность модели (4) при технически необходимых предиктивных оценках остаточного ресурса эксплуатации изделия ответственного назначения путем его периодического мезодиагностирования.

Дальнейшая детализация модели (4) может быть проведена с учетом наличия функциональной связи между промежутком времени между операциями мезодиагностирования Δt_s и их длительностью, определяемой в предлагаемой ресурсной модели относительным параметром $\overline{\Delta t_d}$. Эта связь является очевидным следствием базового уравнения «баланса» эксплуатационных и мезодиагностических поврежденностей материала ОА, который имеет вид

$$\omega_{\text{кр}} = \omega_{si} + \omega_{di} = \omega_{sj} + \omega_{dj}, \quad (5)$$

где $\omega_{\text{кр}}$ – критическая, предельно допустимая величина поврежденности материала ОА, при достижении которой изделие перестает удовлетворять предъявляемым эксплуатационно-техническим требованиям; $\omega_{si}, \omega_{li}, \omega_{sj}, \omega_{dj}$ – соответственно значения эксплуатационной и мезодиагностической поврежденности, например, материала поверхностного слоя МПС анализируемого изделия в различные i -е и j -е времени его эксплуатации, причем $i \neq j$.

Основываясь на соотношении (5), с учетом его геометрической интерпретации, представленной на рис. 1, получим следующую зависимость между кинетическими (временными) параметрами модели (4):

$$\Delta t_3 = k_{эд} (\Delta t_{д1} - \Delta t_{д2}), \quad (6)$$

где $k_{эд} = \operatorname{tg} \alpha_{д} / \operatorname{tg} \alpha_3$ – коэффициент, по сути, характеризующий информационно необходимое прева-лирование интенсивности изменения поврежденности ОА при мезодиагностировании, например, его МПС над интенсивностью изменений эксплуатационной поврежденности.

Подстановка выражения (6) в (4) обеспечивает формирование прогностической модели оста-точного ресурса $T_{ост}$ в следующем виде:

$$T_{ост} = k_{эд} \overline{\Delta t_{д}}, \quad (7)$$

где, как и ранее, $\Delta t_{д2}$ – продолжительность выполнения соответствующей операции мезодиагности-рования. Заметим, что выражение (7) позволяет определить $T_{ост}$ при известном из результатов пред-варительных экспериментов значении параметра $k_{эд}$, характеризующего соотносительность интен-сивностей изменений пораженностей при эксплуатации и мезодиагностировании (ОА), например, его МПС.

Таким образом, в рамках принятых допущений базовая модель расчета остаточного ресурса ОА (4) и ее модификация (7) позволяют решить поставленную задачу его прогнозирования. В первом случае необходимо проведение двух операций мезодиагностирования, а во втором – только одной, но с использованием результатов предварительного мезодиагностического анализа материала ОА, например, дефектности МПС рассматриваемого изделия.

Результаты и обсуждения

Полученная модель прогнозирования остаточного ресурса изделий позволяет провести в даль-нейшем целенаправленные экспериментально-прикладные исследования, обобщение которых позво-лит разработать инженерную методику предиктивной оценки функционального качества ОА, в первую очередь – его МПС. При этом должна быть решена ключевая проблема ТМД – выбор и обоснование наиболее информативного метода, обеспечивающие оперативно-локальное формирова-ние критического значения поврежденности, в частности в анализируемой зоне МПС. Выполненные в этом направлении исследования, например [1], подчеркивают значимость решения этой задачи, в том числе путем экспертно-критериального оценивания [1, 5–7], функционально-диагностических возможностей различных способов локального изменения поврежденности МПС, также характеризу-емой вариациями профиля его микрорельефа. Так, например, было отмечено, что энергоэкстремаль-ный процесс гидроструйной эрозии [1] обладает необходимым информационно-диагностическим по-тенциалом.

В перспективе рациональное применение инструментария ТМД в сочетании с развитием аппа-рата моделирования, пример построения которого представлен выше, позволяет решить кроме про-гностических следующие основные задачи:

- 1) определить расчетно-необходимые константы в более реалистичных моделях разрушения материала, в частности термофлуктуационных в моделях их длительной прочности [8];
- 2) оценить значение исходной, в том числе технологической поврежденности материала ОА, в первую очередь, МПС детали ответственного назначения;
- 3) предложить принципы разработки методики экспресс-определения усталостных характери-стик материалов, особенно значимую при освоении их новых видов [1, 9, 10]. Таким образом, основным результатом выполненного исследования является расчетно-аналитическая формализация связей между текущим состоянием материала изделия и остаточным ресурсом его функционирования, детали-зирования в виде моделей, построенных путем целенаправленного использования соответствующих операций мезодиагностирования. Причем на данном этапе анализа реализация аппарата мезодиагности-рования может составить предмет изучения в рамках соответствующих научно-квалификационных работ, диссертательность которых определяется экспертно-критериальным оцениванием [11–14].

Заключение

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы и сформулировать предварительные обобщения.

Мезодиагностическое воздействие на ОА, в частности на его МПС, является, по сути, безальтер-нативной физико-энергетической технологией, реализующей процесс ускоренной трансформации

исходной функционально-локальной поврежденности материала в его поврежденность критического уровня. Причем информационно-диагностические признаки этого процесса позволяют не только эффективно определять текущее значение поврежденности, но и предложить модель оценки остаточного ресурса ОА в целом.

Модель остаточного ресурса ОА, использующая результаты его периодического мезодиагностирования, способна обеспечить научно-методическую целенаправленность экспериментальным исследованием, связанным с более эффективным изучением эксплуатационно-технологических параметров состояния конструкционных материалов, в первую очередь на этапе производственного освоения их новых видов.

Таким образом, основная перспектива совершенствования разрабатываемого подхода к предиктивному моделированию ресурсно-эксплуатационных характеристик различных ОА состоит в расширении сферы его научно-прикладного использования, в первую очередь при решении задач оценки и/или прогнозирования функциональной поврежденности изучаемых материалов путем развития и рационального применения технологий информационно-физического мезодиагностирования.

Список литературы

1. Барзов А. А., Пузаков В. С., Кузнецов А. В. Вероятностная модель процесса эрозии материалов при энергоэкстремальном гидроструйном воздействии // Наука и техника Казахстана. 2022. № 3. С. 9–21. doi: 10.48081/ZFSP1647
2. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / под общ. ред. В. В. Ключева ; Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. М. : Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Ключева. Т. 7 : в 2 кн. Кн. 1: Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии ; кн. 2: Балицкий Ф. Я., Барков А. В., Баркова Н. А. [и др.]. Вибродиагностика. М. : Машиностроение, 2005.
4. Муравьев В. И. Разрушающие методы контроля : учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре : Комсом.-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2001. 67 с.
5. Работнов Ю. Н. Введение в механику разрушения. М. : Наука, 1987. 97 с.
6. Konson G. R. Non-criteria expertise of research projects: Typed examples // Scientific editor and publisher. 2022. Vol. 7, № 1. P. 34–39. doi: 10.24069/SEP-22-32
7. Цапенко М. В. Многокритериальное оценивание значимости показателей эффективности инновационных проектов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XVIII Междунар. конф. (г. Самара, 20–25 сентябрь 2016 г.). Самара, 2016. С. 72–84.
8. Тутнов А. А., Тутнов И. А. Математическая модель разрушения гетерогенного твердого тела // Трещиностойкость материалов и элементов конструкций ЯЭУ : сб. науч. тр. М. : Энергоатомиздат, 1990. С. 7–18.
9. Арзамасов Б. Н., Соловьева Т. В. [и др.]. Справочник по конструкционным материалам : справочник. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 640 с.
10. Ковалева А. А. Новые процессы и сплавы в машиностроении : учеб. пособие. Красноярск : ГАЦМиЗ, 2003. 120 с.
11. Барзов А. А., Сеина Я. Д., Муканов Р. Б. [и др.]. Определение потенциала результативности научно-квалификационного исследования технологического профиля на этапе его планирования // Наука и техника Казахстана. 2024. № 2. С. 49–58. doi: 10.48081/XICF8407
12. 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.
13. Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С. Нижняя доверительная граница среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых объектов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 38–45.
14. 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.

References

1. Barzov A.A., Puzakov V.S., Kuznetsov A.V. Probabilistic model of the process of erosion of materials under energy-extreme hydrojet action. *Nauka i tekhnika Kazakhstana = Science and Technology of Kazakhstan*. 2022;(3):9–21. (In Russ.). doi: 10.48081/ZFSP1647
2. *Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik: v 7 t. T. 3. Ul'trazvukovoy kontrol' / pod obshch. red. V.V. Klyueva; Ermolov I.N., Lange Yu.V. = Non-destructive testing : handbook : in 7 volumes. Vol. 3. Ultrasonic control / under the general editorship of V. V. Klyuev ; Ermolov I. N., Lange Yu. V. Moscow: Mashinostroenie, 2004:864. (In Russ.)*
3. *Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik: v 7 t. / pod obshch. red. V.V. Klyueva. T. 7: v 2 kn. Kn. 1: Ivanov V.I., Vlasov I.E. Metod akusticheskoy emissii; kn. 2: Balitskiy F.Ya., Barkov A.V., Barkova N.A. [i dr.]. Vibrodiagnostika = Non-destructive testing : handbook : in 7 volumes / under the general editorship of V. V. Klyuev. Vol. 7 :*

- in 2 books. Book 1: Ivanov V. I., Vlasov I. E. *Acoustic emission method*; book. 2: Balitsky F. Ya., Barkov A. V., Barkova N. A. [and others]. *Vibration diagnostics*. Moscow: Mashinostroenie, 2005. (In Russ.)
4. Murav'ev V.I. *Razrushayushchie metody kontrolya: ucheb. posobie = Destructive control methods : textbook*. Komsomol'sk-na-Amure: Komsom.-na-Amure gos. tekhn. un-t, 2001:67. (In Russ.)
 5. Rabotnov Yu.N. *Vvedenie v mekhaniku razrusheniya = Introduction to the mechanics of destruction*. Moscow: Nauka, 1987:97. (In Russ.)
 6. Konson G.R. Non-criteria expertise of research projects: Typed examples. *Scientific editor and publisher*. 2022;7(1):34–39. doi: 10.24069/SEP-22-32
 7. Tsapenko M.V. Multicriteria assessment of the significance of indicators of the effectiveness of innovative projects. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh: tr. XVIII Mezhdunar. konf. (g. Samara, 20–25 sentyabr' 2016 g.) = Problems of management and modeling in complex systems : proceedings of the XVIII International Conference (Samara, September 20-25, 2016)*. Samara, 2016:72–84. (In Russ.)
 8. Tutnov A.A., Tutnov I.A. Mathematical model of destruction of a heterogeneous solid body. *Treshchinostoykost' materialov i elementov konstruktsiy YaEU: sb. nauch. tr. = Crack resistance of materials and structural elements of nuclear power plants : collection of scientific papers*. Moscow: Energoatomizdat, 1990:7–18. (In Russ.)
 9. Arzamasov B.N., Solov'eva T.V. et al. *Spravochnik po konstruktsionnym materialam: spravochnik = Handbook of structural materials : handbook*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2006:640. (In Russ.)
 10. Kovaleva A.A. *Novye protsessy i splavy v mashinostroyeni: ucheb. posobie = New processes and alloys in mechanical engineering : textbook*. Krasnoyarsk: GATsMiZ, 2003:120. (In Russ.)
 11. Barzov A.A., Seina Ya.D., Mukanov R.B. et al. Determination of the effectiveness potential of scientific and qualification research of a technological profile at the planning stage. *Nauka i tekhnika Kazakhstana = Science and Technology of Kazakhstan*. 2024;(2):49–58. (In Russ.). doi: 10.48081/XICF8407
 12. Dmitriev 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.)
 13. 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.)
 14. 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.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Александрович Барзов

доктор технических наук, профессор кафедры
технологии ракетно-космического машиностроения,
ведущий научный сотрудник,
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
(Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1)
E-mail: a.a.barzov@gmail.com

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

Яна Дмитриевна Сеина

магистр,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)
E-mail: yaseina@yandex.ru

Aleksandr A. Borzov

Doctor of technical sciences, professor
of the sub-department of rocket
and space engineering technology,
leading researcher,
Lomonosov Moscow State University
(1 Leninskie gory, Moscow, Russia)

Aleksandr S. Grigoriev

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

Yana D. Seina

Master degree student,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Вячеслав Сергеевич Пузаков

кандидат технических наук, доцент кафедры
промышленных теплоэнергетических систем,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1);
генеральный директор,
ООО «Бюро Энергетика»
(Россия, г. Раменское, ул. Воровского, 5)
E-mail: PuzakovVS@mail.ru

Асылбек Жумабекович Касенов

кандидат технических наук, профессор
кафедры машиностроения и стандартизации,
Торайгыров университет
(Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64)
E-mail: asylbek_kasenov@mail.ru

Наталья Николаевна Сафронова

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

Vyacheslav S. Puzakov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of industrial thermal power systems,
National Research University "MEI"
(build. 1, 14 Krasnokazarmennaya street,
Moscow, Russia);
General director,
LLC "Bureau Energetika"
(5 Vorovskiy street, Ramenskoye, Russia)

Assylbek Zh. Kasenov

Candidate of technical sciences,
professor of the sub-department
of mechanical engineering and standardization,
Toraighyrov University
(64 Lomova street, Pavlodar, Republic of Kazakhstan)

Nataliya N. Safronova

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 18.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 08.11.2024

Принята к публикации/Accepted 10.12.2024

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

А. В. Заяра¹, В. П. Фандеев²

¹ Военный инновационный технополис «Эра», Анапа, Россия

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

¹ zaw1966@mail.ru, ² fandeevVP@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* С целью повышения универсальности моделирования в процессе распознавания технического состояния сложной системы предлагается решение задачи его статистической классификации. *Материалы и методы.* Принадлежность текущего состояния к определенному классу оценивается подтверждением гипотезы с использованием решающей функции на основе концепции «индуктивного поведения». *Результаты и выводы.* Подтверждение осуществляется оценкой вероятности попадания текущих параметров объекта в двумерный параллелепипед совместной функции плотности, определенной с использованием метода ядерной оценки плотности вероятности.

Ключевые слова: статистическая классификация, техническое состояние, ядерная оценка плотности вероятности, решающая функция, индуктивное поведение, двумерная функция плотности

Для цитирования: Заяра А. В., Фандеев В. П. Применение ядерной оценки плотности вероятности для решения задачи классификации технического состояния сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 117–125. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-15

APPLICATION OF THE KERNEL PROBABILITY DENSITY ESTIMATE TO SOLVE THE PROBLEM OF CLASSIFICATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF COMPLEX SYSTEMS

A.V. Zayara¹, V.P. Fandeev²

¹ Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russia

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

¹ zaw1966@mail.ru, ² fandeevVP@mail.ru

Abstract. *Background.* In order to increase the versatility of modeling in the process of recognizing the technical condition of a complex system, a solution to the problem of its statistical classification is proposed. *Materials and methods.* Belonging of the current state to a certain class is estimated by confirming the hypothesis using a decision function based on the concept of "inductive behavior". *Results and conclusions.* Confirmation is carried out by estimating the probability of the current parameters of the object falling into a two-dimensional parallelepiped of the joint density function, determined using the method of kernel probability density estimation.

Keywords: statistical classification, technical condition, kernel probability density estimate, decision function, inductive behavior, two-dimensional density function

For citation: Zayara A.V., Fandeev V.P. Application of the kernel probability density estimate to solve the problem of classification of the technical condition of complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):117–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-15

Введение

Современные методы распознавания технического состояния сложных технических систем требуют применения точных статистических методов, способствующих более корректному анализу и интерпретации данных. Традиционно в рамках статистической классификации принято использовать предположение о статистической независимости диагностических признаков. Однако это

допущение может привести к потере важной информации о взаимосвязях между параметрами, что, в свою очередь, негативно сказывается на достоверности распознавания технического состояния.

В данной статье рассматривается применение метода ядерной оценки плотности вероятности (в англоязычной научной литературе имеет наименование «*Kernel density estimation, KDE*») в рамках распознавания технического состояния сложных систем на основе статистической классификации для улучшения универсальности моделирования. В классическом представлении в качестве вероятностной модели используется многомерное гауссово распределение, основанное на допущении о независимости диагностических признаков [1]. В качестве альтернативного варианта предлагается использовать математический аппарат, позволяющий сохранить информацию о потенциальных зависимостях между контролируемыми параметрами. В частности, вместо представления многомерного распределения как произведения одномерных гауссовых распределений совместная плотность распределения определяется с помощью *KDE*-подхода, предоставляющего возможность адекватной оценки многомерных распределений.

Материалы и методы

Решение задачи распознавания в аспекте статистической классификации предусматривает отнесение состояния объекта диагностирования к одному из классов. Условие задачи формулируется следующим образом. В ограниченный начальный период эксплуатации определяются значения параметров, которые используются в процессе контроля технического состояния:

$$\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots, \xi_n\}. \quad (1)$$

Каждый элемент этого множества представлен совокупностью значений диагностических параметров в конкретный момент времени $\xi_i = \xi_i(t)$. Множество Ξ характеризует функцию состояния $Q(\xi)$. Формулируется предположение, что при данной совокупности параметров ξ координат многомерной функции $Q(\xi)$ текущее состояние объекта относится к определенному классу, как правило, параметрическому [1]. Для этого выбирается решающая функция $\delta(\Xi)$, с помощью которой на основании статистической обработки апостериорных данных предположение подтверждается количественным аргументом – условной вероятностью.

В процессе экспериментальных исследований значения функции состояния $Q(\xi)$ приобретают случайные значения, образуют множество Ξ . Согласно аксиоматике А. Н. Колмогорова [2], множеству Ξ соответствует пространство вероятностных исходов Ω в вероятностном пространстве $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, где Ω – пространство вероятностных исходов, которое содержит все возможные результаты случайного эксперимента; $\mathcal{F}$ – алгебра, состоящая из подмножеств Ω , которая включает в себя все события, для которых можно определить вероятность; $\mathbb{P}$ – это вероятностная мера, которая назначает вероятности событиям из $\mathcal{F}$:

$$\mathbb{P}(\mathcal{F}) = 1. \quad (2)$$

Исходя из постулата того, что множеству Ξ соответствует пространство вероятностных исходов Ω в вероятностном пространстве $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P}_\xi)$, выводится следующее заключение. Пространство Ω является основанием всего вероятностного пространства, на котором определяются все его остальные элементы. Иначе говоря, в геометрической интерпретации Ω – это основание, на котором строится вся структура вероятностного пространства. Все события (элементы $\mathcal{F}$) и их вероятности (функция $\mathbb{P}$) определяются относительно этого множества исходов.

Применительно к распознаванию с использованием статистической классификации пространство вероятностных исходов Ω объединяет все возможные вариации многомерного вектора (1). На этапе обучения модели распознавания в процессе эксплуатации объекта оценивается принадлежность его текущего состояния к определенному классу в конкретный момент времени t_i :

$$\Xi(t_i) = \{\xi_1(t_i), \xi_2(t_i), \dots, \xi_j(t_i), \dots, \xi_n(t_i)\} \in \Omega. \quad (3)$$

Тогда $\mathcal{F}$ определяет этот факт как событие $\mathcal{F} = \mathcal{A}(\Xi(t_i))$, а вероятностная мера представлена апостериорной вероятностью этого события $\mathbb{P} = \mathbb{P}_\xi(\Xi(t_i))$.

Дальнейшее продолжение интерпретации вероятностного пространства производится в соответствии с хрестоматийными рекомендациями Б. В. Гнеденко [3], которые основываются на понятии многомерной случайной величины. При рассмотрении динамики вероятностного пространства $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P}_\xi)$

во времени фиксируется событие e в конкретный момент времени t_i . Иначе говоря, элементарному событию e поставлена в соответствие точка n -мерного Евклидова пространства:

$$e \sim \mathcal{A}(\xi_1), e \sim \mathcal{A}(\xi_1), \dots, e \sim \mathcal{A}(\xi_n).$$

Если каждая из функций $e \sim \mathcal{A}(\xi_i)$, $i = 1 \dots n$ измерима относительно введенной в множестве случайных событий $\mathcal{F}$ вероятности, то совокупность чисел $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ является n -мерной случайной величиной. Следовательно, функция

$$\mathcal{A}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = \mathbb{P}_{\xi} \{x_{a1} < \xi_1 < x_{b1}, x_{a2} < \xi_2 < x_{b2}, \dots, x_{an} < \xi_n < x_{bn}\} \quad (4)$$

выступает в качестве n -мерной функции распределения случайного вектора $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, где $(x_{a1}, x_{a2}, \dots, x_{an})$ и $(x_{b1}, x_{b2}, \dots, x_{bn})$ – векторы предельных значений (наименьших и наибольших) контролируемых параметров объекта диагностирования. Очевидно, что положение точки $\{\xi_1(t_i), \xi_2(t_i), \dots, \xi_n(t_i)\}$ зависит от целого ряда факторов. Тогда функция (4) при такой интерпретации позволяет произвести для каждого из значений контролируемых параметров оценивание вероятности попадания рассматриваемой точки в n -мерный параллелепипед с ребрами параллельными осям координат по интервалам:

$$x_{a1} < \xi_1 < x_{b1}, x_{a2} < \xi_2 < x_{b2}, \dots, x_{an} < \xi_n < x_{bn}.$$

С помощью функции распределения становится возможно определить вероятность того, что точка $\{\xi_1(t_i), \xi_2(t_i), \dots, \xi_n(t_i)\}$ окажется в заданном, ограниченном объеме n -мерного пространства внутри n -мерного параллелепипеда.

В контексте статистической классификации, как задачи распределения вероятности по классам, следует сопоставить виды технического состояния. На основе некоторой решающей функции $\delta(d / \Xi(t))$, которая принимает на вход данные (3) и выдает решение – значение вероятности, с которой текущее состояние объекта принадлежит к определенному классу:

$$\delta(d / \Xi(t_i)) = P(d = d_{C_\lambda} | \Xi(t) = \Xi(t_i)), \quad (5)$$

где $P(d = d_{C_\lambda} | \Xi(t) = \Xi(t_i))$ – условная вероятность того, что в текущий момент времени t_i состояние объекта характеризуется $\Xi(t_i)$ и принадлежит к классу C_λ . Другими словами, задача состоит в нахождении решающей функции $\delta(d)$, которую можно использовать для вынесения окончательного решения $d_i \in D$, где D – пространство возможных решений.

Процедуру выбора какой-либо решающей функции в процессе распознавания текущего состояния можно охарактеризовать как «индуктивное поведение» [4], концепция которого в аспекте подбора инструментария для поиска решения (5) заключается в количественном подтверждении гипотезы о принадлежности текущего состояния к определенному классу.

Оригинальная трактовка концепции индуктивного поведения определяет [5], что «критерий статистической гипотезы является правилом индуктивного поведения». Это означает, что выбор гипотезы и принятие решения об ее истинности основывается на наблюдаемых данных и статистических методах. Далее в процессе принятия решения первым существенным шагом является установление некоторых принципов, которые должны привести к рассмотрению всех возможных решающих функций с точки зрения их соответствия целям индуктивного поведения. Как альтернатива классическому представлению решающих функций, равномерно лучшей и допустимой [4], рассматривается такая решающая функция, как проверка статистической гипотезы. Под гипотезой понимается утверждение, что неизвестное распределение $\mathcal{F}$ случайной величины Ξ есть элемент данного подмножества $f \in \mathcal{F}$. При любом непустом $f \subset \mathcal{F}$ мы будем через H_f обозначать гипотезу о том, что $f \in \mathcal{F}$. Задача проверки гипотезы H_f является частным случаем общей задачи принятия решения. В случае проверки гипотезы H пространство D окончательных решений состоит из двух элементов d_1 и d_2 , где d_1 означает решение принять гипотезу H , а d_2 – решение ее отвергнуть. Данная формулировка гармонично укладывается в рамки концепции «индуктивного поведения».

Решающая функция для определения принадлежности текущего состояния объекта в данном контексте представляет собой правило, которое на основе значений двух контролируемых параметров формирует решение о принадлежности текущего состояния к определенному классу. Эта функция строится на основе вероятностной модели, которая использует совместную функцию плотности вероятности для оценки вероятности попадания текущих значений параметров в заданные границы класса.

Для визуализации данной процедуры предлагается ограничиться всего двумя параметрами, представленными временными рядами $\xi_1(t_i)$ и $\xi_2(t_i)$. В рассматриваемом случае решающая функция $\delta(d/\Xi(t))$ для классификации текущего состояния объекта с показателями $\Xi(t) = (\xi_1(t), \xi_2(t))$ в зависимости от их принадлежности к классу C_λ , определяется следующим образом:

$$\delta(d/\Xi(t)) = \begin{cases} 1, & \text{при } P(\Xi(t) \in C_\lambda | \xi_1(t) = \xi_1, \xi_2(t) = \xi_2) \geq \theta; \\ 0, & \text{при } P(\Xi(t) \notin C_\lambda | \xi_1(t) = \xi_1, \xi_2(t) = \xi_2) < \theta, \end{cases} \quad (6)$$

где $\xi_1(t) = \xi_1, \xi_2(t) = \xi_2$ – текущие значения контролируемых параметров электроаппаратуры; $P(\Xi(t) \in C_\lambda | \xi_1(t) = \xi_1, \xi_2(t) = \xi_2)$ – апостериорная вероятность принадлежности текущих наблюдений к классу C_λ ; θ – пороговое значение вероятности, определяющее границу между классами.

Определение численного показателя θ должно обеспечивать гарантированную идентификацию текущего технического состояния. Для случая, когда градацией технического состояния предусматривается несколько уровней последовательных переходов от одного класса к другому, определяется количество классов m более двух ($m > 2$). С учетом (2) до начала контроля можно допустить возможность равной вероятности принадлежности текущего состояния ко всем предусмотренным классам

$\mathbb{P}(\Xi(t_i)) = \frac{1}{m}$. Тогда целесообразно назначить для θ критерий, предполагающий значение вероятности в два раза превалирующее над вероятностью исхода с равной долей неопределенности для классов. В этом случае значение априорно должно удовлетворять неравенству $\theta > \frac{2}{m}$, где $m > 2$.

Формализация решающей функцией системы (6) подтверждает определение критерия статистической гипотезы, согласно которому необходимо, чтобы было ровно два возможных действия. При этом любое правило δ , предписывающее предпринимать первое действие A , когда выборочная точка, получающаяся в результате наблюдения (события), оказывается среди заданного набора точек, и действие B (противоположное событие) – во всех других случаях, называется критерием статистической гипотезы [5].

Таким образом, итоговым показателем оценивания является значение вероятности, определенное на основе совместной функции плотности вероятности $f_\Xi(\xi_1, \xi_2)$. С учетом двумерного распределения это значение характеризует вероятность попадания текущих значений в заданный объемный параллелепипед, что соответствует принадлежности к определенному классу. Подтверждая или опровергая выдвинутое предположение, вероятность является наблюдаемым свойством любой гипотезы, которая определяет значения параметров выборочной совокупности [6].

Решающая функция (5) предполагает определение совместной функции плотности вероятности $f(\xi_1, \xi_2)$, которая описывает распределение значений этих параметров в пространстве. Значение вероятности оценивается как объем параллелепипеда P_{C_λ} с прямоугольным основанием $x_{a1} < \xi_1 < x_{b1}$, $x_{a2} < \xi_2 < x_{b2}$, стороны которого соответствуют границам значений параметров для определенного класса:

$$P(\Xi(t) \in C_\lambda | x_{a1} < \xi_1 < x_{b1}, x_{a2} < \xi_2 < x_{b2}) = \int_{x_{a1}}^{x_{b1}} \int_{x_{a2}}^{x_{b2}} f(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2. \quad (7)$$

Расчет предлагается проводить с применением *KDE*, который классифицируется как непараметрический метод, не предполагающий заранее определенной формы распределения данных. Он не использует фиксированное количество параметров (например, как в нормальном распределении среднее и дисперсию) для описания статистической модели, а позволяет самим данным определять форму распределения.

Использование произведения плотностей распределения для определения совместной плотности вероятности возможно только в случае независимых случайных величин. Это связано с тем, что независимость случайных величин подразумевает, что знание значения одной из них не дает никакой информации о значении другой.

Когда случайные величины зависимы, это простое умножение функций плотности по меньшей мере некорректно, так как изменение одной величины влияет на распределение другой. В этом случае

совместная плотность вероятности должна учитывать их зависимость, и ее нельзя просто получить путем перемножения индивидуальных плотностей. Метод ядерной оценки плотности позволяет оценивать совместную плотность вероятности без предположений о форме распределения. Это особенно валидно, когда зависимость между случайными величинами сложна и не может быть описана простыми параметрическими моделями.

Учет зависимости: *KDE* использует информацию обо всех наблюдениях в выборке для оценки плотности, что позволяет учитывать зависимости между случайными величинами. Ядерная функция, применяемая к каждой точке данных, создает сглаженную оценку плотности, которая отражает структуру данных.

В процессе применения метода ядерной оценки плотности отсутствует необходимость в выдвижении конкретных гипотез о форме распределения. Для оценивания используются статистические данные с целью создания зависимости изменения плотности на основе самой структуре данных, что делает этот метод более адаптивным.

С этой целью используется ядерная функция. Для каждого элемента из статистической выборки оценка плотности рассчитывается с учетом выбранных ядерной функции $K(\bullet)$ и ширины окна или параметра сглаживания h , которые позволяют «сгладить» непрерывную функцию плотности (график распределения) и адаптироваться к особенностям и структуре данных. Это достигается построением для каждого элемента непрерывной кривой (ядра), а затем сложением этих кривых с целью получения единой гладкой оценки плотности. В практике *KDE* распространено несколько типов ядер (рис. 1), наиболее применяемым является Гауссово [4]. Тем не менее его применение создает слишком сглаженные оценки особенно при небольших выборках.

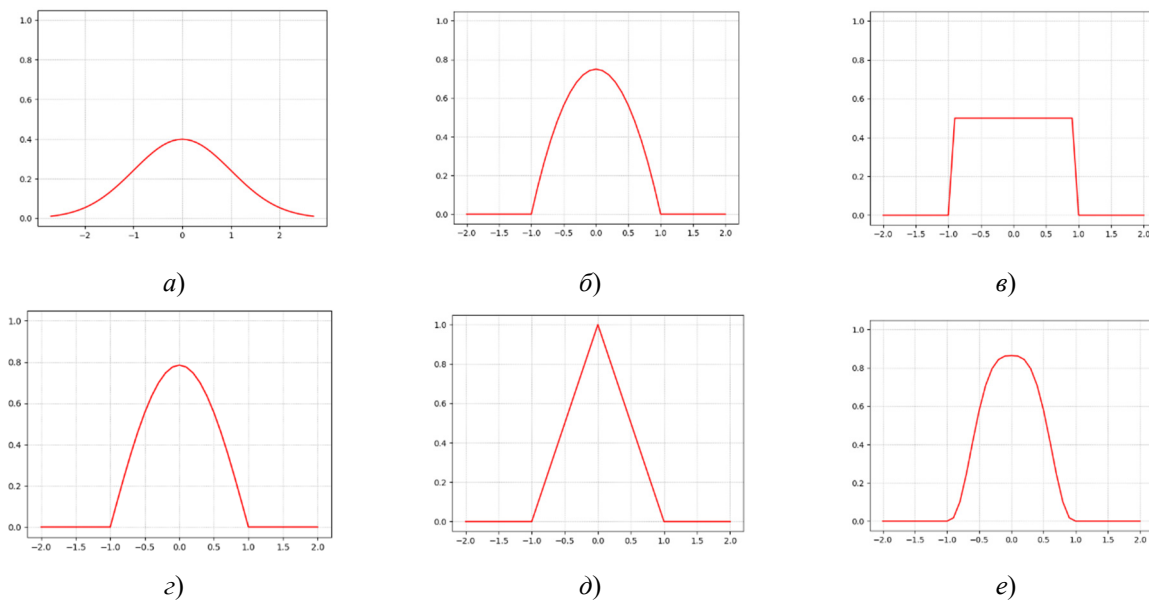


Рис. 1. Графики, поясняющие форму различных ядер:

a – Гауссово; *б* – Епанечниково; *в* – равномерное; *г* – косинусоидальное; *д* – треугольное; *е* – трикубическое

Ядро Епанечникова имеет более узкую форму по сравнению со стандартным ядром Гаусса, что делает его хорошим вариантом, если данные имеют «модальное» поведение и значения плотности быстро снижаются при удалении от центра [4]. Вместе с этим результат получается менее гладким по сравнению с Гауссовым.

Ядро Епанечникова задается следующим образом:

$$K_E(u) = \begin{cases} \frac{3}{4}(1-u^2), & \text{для } |u| \leq 1; \\ 0, & \text{для } |u| > 1. \end{cases} \quad (8)$$

где $u = \frac{x - x_i}{h}$; x_i – текущий элемент выборки.

В данном контексте параметр u обычно называется нормализованным расстоянием, показывающим насколько далеко значение x находится от точки x_i (с учетом ширины окна). Этот параметр стандартизирует расстояние между точками, что позволяет ядру оценивать плотность в зависимости от положения точки относительно других наблюдений в выборке. Также значения u используются для оценивания попадания наблюдаемой точки в поддерживающую область ядра Епанечникова. Если $|u| \leq 1$, ядро будет иметь ненулевое значение, в случае $|u| > 1$, ядро будет равно нулю (точка x считается слишком удаленной от точки x_i).

Наиболее предпочтительным видится применение ядра Епанечникова для оценки плотности распределения экспериментально полученных значений контролируемых параметров объекта диагностирования по ряду причин:

- 1) обеспечение устойчивости к наличию нескольких экстремумов в графике плотности временных рядов контролируемых параметров, что делает его более подходящим для анализа выборки с различными всплесками;
- 2) хорошая способность оценивать данные с переменной плотностью распределения, которую обеспечивает узкая форма ядра Епанечникова, что делает процедуру более гибкой при оценке данных с переменной плотностью;
- 3) более устойчивое поведение к выбросам в данных по сравнению с гауссовым ядром, что позволяет более корректно оценивать данные при наличии неточностей и шумов.

Результаты

Выбор ядра Епанечникова для оценивания плотности распределения экспериментально полученных значений контролируемых параметров обеспечивает более адекватное представление о данных, особенно в условиях, когда имеется несколько экстремумов. Это важно для задач, связанных с распознаванием технического состояния реальных объектов.

Помимо формы ядра другим параметром, влияющим на достоверность оценивания плотности вероятности выборки, является параметр сглаживания (ширины окна) h , влияющий на ширину ядра и, следовательно, на уровень сглаживания оцененной плотности. В соответствии с рекомендациями [7] оптимальный параметр сглаживания связан с объемом выборки n соотношением

$$n - \frac{\left[\frac{(1+h^2)}{h^2} \right]^2 - 1}{\frac{(1+h^2)}{(1+0,5h^2)} - 1} = 0. \quad (9)$$

Параметр h определяется решением уравнения (9) численными методами с учетом объема выборки.

Для случая совместного распределения можно использовать двумерное ядро, что позволяет непосредственно оценивать совместную плотность вероятности. Представление двумерной эмпирической плотности вероятности в виде

$$\hat{f}(\xi_1, \xi_2) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\xi_1 - \xi_{1i}}{h}, \frac{\xi_2 - \xi_{2i}}{h}\right) \quad (10)$$

также рассмотрено в работе [7].

При подстановке выражения для ядра Епанечникова (8) в выражение (10) получается зависимость для двумерной функции плотности вероятности, определенной методом *KDE*:

$$\hat{f}(\xi_1, \xi_2) = \begin{cases} \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n \frac{3}{4} \left(1 - \frac{\xi_1^2 + \xi_2^2}{h^2} \right), & \text{если } \xi_1^2 + \xi_2^2 \leq h^2; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (11)$$

Применение встроенных библиотек *Python* [8] для реализации метода ядерной оценки плотности вероятности (*KDE*) предоставляет необходимые инструменты для визуализации и статистической классификации. Одной из ключевых библиотек, корректно реализующих метод *KDE*, является *scikit-*

learn, которая предлагает удобные функции для оценки плотности с различными ядрами, включая ядро Епанечникова.

Библиотека *scipy* также предоставляет функции для работы с многомерными распределениями и может быть использована в сочетании с *numpy* для выполнения необходимых математических операций. Эти библиотеки позволяют не только оценивать плотность вероятности, но и визуализировать результаты в 3D-формате, что значительно упрощает интерпретацию данных.

Использование библиотек *Python*, таких как *scikit-learn* и *matplotlib*, позволяет визуализировать построение поверхности двумерной плотности распределения (9), но и проводить сопутствующие расчеты. Пример двумерной полимодальной поверхности (11) в совокупности с параллелепипедом (7), объем которого численно характеризует принадлежность к статистическому классу, представлен на рис. 2.

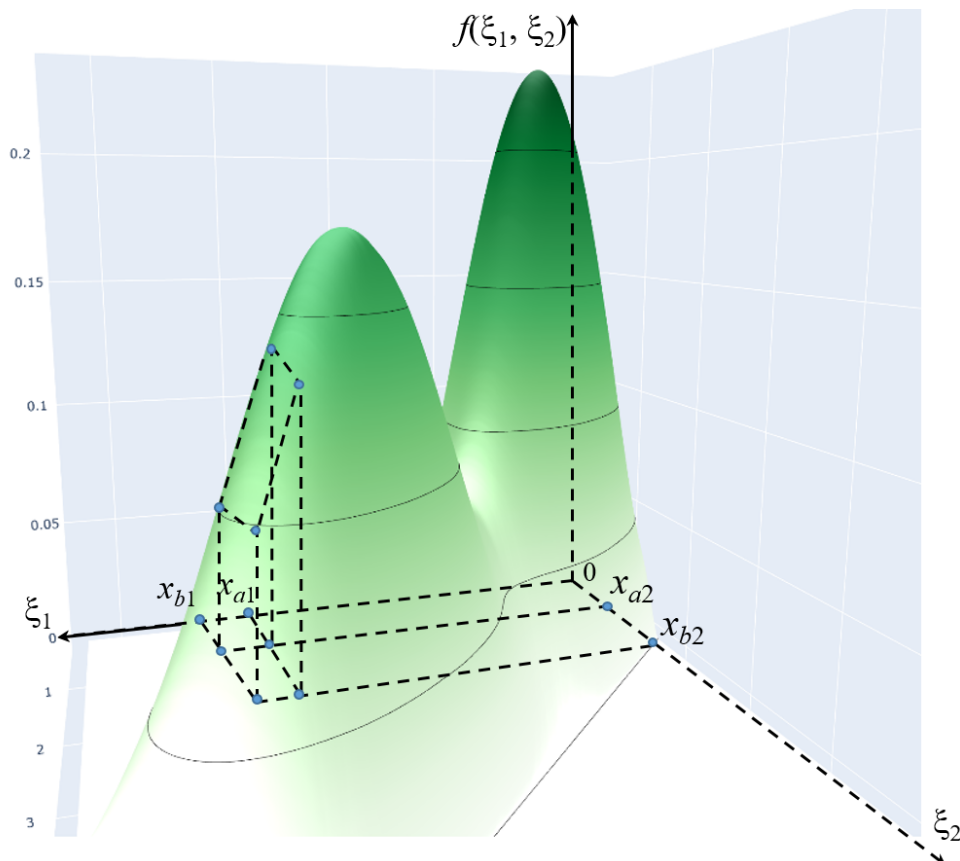


Рис. 2. Пример графика двумерной функции плотности вероятности $\hat{f}(\xi_1, \xi_2)$ с выделенным параллелепипедом

Визуализация процедуры путем построения примера поверхности распределения (11) в 3D-формате подтверждает универсальность моделирования (характеризует полноту отражения в модели свойств реального объекта) в процессе классификации технического состояния.

Заключение

Таким образом, в данной статье было обосновано применение ядерной оценки плотности вероятности для решения задачи статистической классификации технического состояния сложных систем. Основное внимание уделено обоснованию выбора решающей функции, основанной на концепции «индуктивного поведения», которая учитывает как объективные, так и субъективные аспекты принятия решений в условиях неопределенности. В процессе исследования была рассмотрена проверка гипотезы о принадлежности текущего состояния системы к определенному параметрическому классу. Для этого использовалась решающая функция, которая численно оценивала вероятность попадания значений контролируемых параметров объекта в двумерный параллелепипед, заданный совместной функцией плотности, полученной с помощью метода ядерной оценки плотности вероятности.

Результаты показали, что применение *KDE* позволяет адекватно моделировать распределение параметров сложных систем и, следовательно, более корректно оценивать степень принадлежности текущего состояния реального объекта к соответствующему классу. Это, в свою очередь, способствует улучшению качества принятия решений и повышению достоверности классификации различных видов технического состояния сложных систем.

Таким образом, предложенный подход не только позволяет аргументированно подтвердить гипотезу о принадлежности текущего состояния к определенному параметрическому классу, но и демонстрирует высокую эффективность метода ядерной оценки плотности вероятности как инструмента для распознавания технического состояния сложных систем.

Список литературы

1. Гаскаров Д. В., Голинкевич Т. А., Мозгалеvский А. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / под ред. Т. А. Голинкевича. М. : Сов. радио, 1974. 224 с.
2. Колмогоров А. Н. Основные понятия теории вероятностей. 2-е изд. М. : Наука, 1974. 120 с.
3. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей : учебник. Изд. 3-е, перераб. М. : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1961. 406 с.
4. Вальд А. Статистические решающие функции // Позиционные игры : сб. ст. / под ред. Н. Н. Воробьева, И. Н. Врублевской. М. : Наука, 1967. 524 с.
5. Нейман Е. Вводный курс теории вероятностей и математической статистики / под ред. акад. Ю. В. Линника. М. : Наука, 1968. 448 с.
6. Fisher R. A. The Logic of Inductive Inference // Journal of the Royal Statistical Society. 1935. Vol. 98, № 1. P. 39–82.
7. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применение. 1969. Т. 14, вып. 1. С. 153–158 // Math-Net.Ru. Общероссийский математический портал. URL: <http://www.mathnet.ru/rus/agreement> (дата обращения: 18.01.2025).
8. Seaborn Kdeplot. A Comprehensive Guide // Geeksforgeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/seaborn-kdeplot-a-comprehensive-guide/> (дата обращения: 03.02.2025).

References

1. Gaskarov D.V., Golinkevich T.A., Mozgalevskiy A.V. *Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury* = Forecasting the technical condition and reliability of electronic equipment. Moscow: Sov. radio, 1974:224. (In Russ.)
2. Kolmogorov A.N. *Osnovnye ponyatiya teorii veroyatnostey. 2-e izd.* = Basic concepts of probability theory. 2nd ed. Moscow: Nauka, 1974:120. (In Russ.)
3. Gnedenko B.V. *Kurs teorii veroyatnostey: uchebnik. Izd. 3-e, pererab.* = Course of probability theory : textbook. 3rd ed., revised. Moscow: Gos. izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 1961:406. (In Russ.)
4. Val'd A. Statistical decision functions. *Pozitsionnye igry: sb. st.* = Positional games : collection of articles. Moscow: Nauka, 1967:524. (In Russ.)
5. Neyman E. *Vvodnyy kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki* = Introductory course in probability theory and mathematical statistics. Moscow: Nauka, 1968:448. (In Russ.)
6. Fisher R.A. The Logic of Inductive Inference. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1935;98(1):39–82.
7. Epanechnikov V.A. Nonparametric estimation of multidimensional probability density. *Teoriya veroyatnosti i ee primeneniye* = Probability theory and its application. 1969;14(1):153–158. (In Russ.). Available at: <http://www.mathnet.ru/rus/agreement> (accessed 18.01.2025).
8. Seaborn Kdeplot. A Comprehensive Guide. *Geeksforgeeks*. Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/seaborn-kdeplot-a-comprehensive-guide/> (accessed 03.02.2025).

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Заяра

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
научно-исследовательского отдела,
Военный инновационный технополис «ЭРА»
(Россия, г. Анапа, Пионерский пр-т, 41)
E-mail: zaw1966@mail.ru

Andrey V. Zayara

Candidate of technical sciences,
senior research fellow of the research department,
Military Innovative Technopolis "ERA"
(41 Pionersky avenue, Anapa, Russia)

Владимир Петрович Фандеев

доктор технических наук, профессор, преподаватель
кафедры общепрофессиональных дисциплин,
Филиал Военной академии
материально-технического
обеспечения имени генерала армии
А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: fandeevVP@mail.ru

Vladimir P. Fandeev

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 16.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 14.11.2024

Принята к публикации/Accepted 25.11.2024

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.89, 006.015.8, 519.718, 519.876.2

doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-16

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ВЛИЯНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ГЕОПОЛИТИКУ И БЕЗОПАСНОСТЬ: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И УГРОЗЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

А. В. Маслобоев¹, В. Н. Цыгичко²

¹ Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

² Институт системного анализа Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, Россия

¹ a.masloboev@ksc.ru, ² vtsygichko@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Работа направлена на исследование современных тенденций развития искусственного интеллекта и характера их влияния на геополитические процессы, глобальную и региональную безопасность. Установление и осмысление истоков возникновения этих тенденций необходимо при разработке эффективных технологических решений, обеспечивающих достижение национальных целей развития страны в области защиты ее национальных интересов в глобальном информационном пространстве и поддержании устойчивого функционирования связанных с ним региональных критических инфраструктур. *Материалы и методы.* Системный анализ актуальных проблем цифровой трансформации общества в результате внедрения технологий искусственного интеллекта во всех сферах общественных отношений проводился по открытым литературным источникам научно-технической информации, включая доклады федеральных органов исполнительной власти и отчеты высокотехнологичных компаний, и базируется на эвристическом подходе и экспертных оценках. *Результаты и выводы.* Дана оценка геополитическим последствиям цифровой трансформации экономики и управления, основанной на применении технологий искусственного интеллекта в социально-экономической и военно-политической сферах. Определены глобальные риски и выявлены потенциальные угрозы нарушения безопасности и устойчивости критических инфраструктур, обеспечивающих жизненно важные функции общества и государства, в условиях использования искусственного интеллекта и автономных самоорганизующихся систем. Рассмотрен спектр направлений перспективного применения программно-технических средств искусственного интеллекта для актуальных приложений. Результаты анализа позволили конкретизировать постановки задач и определиться с выбором инструментария для разработки подходов, методов и технологий объяснимого искусственного интеллекта для информационной поддержки принятия интерпретируемых решений по превентивному управлению объектами критических инфраструктур с целью повышения их устойчивости к деструктивным воздействиям искусственно инициированного характера.

Ключевые слова: искусственный интеллект, цифровая трансформация, геополитика, угрозы безопасности, управление рисками, устойчивость, критическая инфраструктура

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2025-0054).

Для цитирования: Маслобоев А. В., Цыгичко В. Н. Анализ тенденций влияния искусственного интеллекта на геополитику и безопасность: новые вызовы и угрозы цифровой трансформации // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 126–135. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-16

TREND ANALYSIS IN THE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IMPACT ON GEOPOLITICS AND SECURITY: NEW CHALLENGES AND THREATS OF DIGITAL TRANSFORMATION

A.V. Masloboev¹, V.N. Tsygichko²

¹ Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Center
"Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems of the Federal Research Center
"Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia

² Institute of Systems Analysis of the Federal Research Center "Computer Sciences and Control"
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ a.masloboev@ksc.ru, ² vtsygichko@inbox.ru

Abstract. Background. The study is aimed at the analysis of state-of-the-art trends in the development of artificial intelligence and the nature of their impact on geopolitical processes, global and regional security. Identification and comprehending the origins of these trends is necessary when engineering effective technological solutions that ensure the achievement of national development goals of the state in the field of protecting its national interests in the cyberspace and maintaining the resilient operation of the related regional critical infrastructures. *Materials and methods.* A systems analysis of the current problems of digital transformation of the society as a result of the introduction of artificial intelligence technologies in all spheres of public relations was carried out using open literary sources of scientific and technical information, including reports of federal executive authorities and reports of high-tech companies, and is based on a heuristic approach and expert judgements. *Results and conclusions.* The geopolitical consequences of digital transformation of the economy and management based on the application of artificial intelligence technologies in the socio-economic and military-political spheres are evaluated. Global risks and potential threats to the security and resilience of critical infrastructures that provide essential functions of society and the state when using artificial intelligence and autonomous self-organizing systems are disclosed and specified. The range of promising deployment directions of the AI-based program-technical tools for urgent applications is considered. The analysis outputs allowed us to specify the problem statements and make the rational choice of toolkit for the development of approaches, methods and technologies of explicable artificial intelligence for information support of interpretable decision-making on preventive management of critical infrastructure facilities and critical entities in order to improve their resilience under destructive impacts of artificially initiated nature.

Keywords: artificial intelligence, digital transformation, geopolitics, security threats, risk management, 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., Tsygichko V.N. Trend analysis in the artificial intelligence impact on geopolitics and security: new challenges and threats of digital transformation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):126–135. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-16

Введение

XXI в. стал эпохой беспрецедентных научно-технологических прорывов. Особенно отчетливо это видно на примере сферы информационно-коммуникационных технологий, где стремительное развитие искусственного интеллекта (ИИ) и тотальная цифровизация оказали необратимое, глубокое влияние на все аспекты жизни общества и государства. В настоящее время искусственный интеллект выступает как движущей силой глобального прогресса, так и средством решения актуальных задач, стоящих перед человечеством, в самых разных областях, включая социально-экономическую и военно-политическую сферы. В отличие от информатизации, которая в XX в. изменила способы обработки и передачи информации, ИИ трансформирует саму природу принятия решений, управления и взаимодействия между потребителями информации – властью, бизнес-сообществом и отдельными индивидами, а также государствами и корпорациями на международной арене. При этом процесс цифровой трансформации с применением ИИ создает как новые возможности для научно-технического прогресса и поступательного устойчивого развития, так и серьезные вызовы и угрозы для региональной, национальной и глобальной безопасности. Технологии и инструменты ИИ не только ускоряют прогресс, но и формируют новые геополитические реалии, переопределяя баланс сил, методы ведения конфликтов и подходы к обеспечению безопасности.

В работе предлагается системный анализ современных тенденций информатизации с применением систем ИИ в условиях цифровой экономики, а также рассматриваются новые вызовы и потенциальные угрозы национальной безопасности, возникающие на региональном уровне в свете влияния этих тенденций.

Тенденции развития и сферы влияния ИИ

Развитие ИИ оказывает существенное влияние на геополитическое положение и будущее нашей страны. Для использования преимуществ своего географического положения России необходимо постоянно совершенствовать свою уникальную информационную, транспортную, производственную и другие критические инфраструктуры, а также системы обеспечения их безопасности, опираясь на широкие возможности современных технологий и стандартов ИИ. Цифровизация инфраструктурных объектов и систем с применением ИИ является одним из ключевых факторов для достижения главной геополитической цели – использования своего географического положения для ускоренного экономического и социального развития и занятия достойного места в мировой экономике [1–3].

Современный мир до сих пор характеризуется двумя устоявшимися противоречивыми тенденциями [3, 4]: углублением мирового разделения труда и взаимозависимости и непрерывной борьбой за экономические интересы, военное превосходство, политическое, идеологическое и культурное влияние. При этом сегодня наблюдается новый виток обострения этой борьбы, в которой ИИ становится новым инструментом геополитики, трансформирующим методы и средства достижения глобальных и национальных целей, объединяя в себе весь потенциал информационно-коммуникационных технологий и моделирующих про-активных систем.

Трансформация глобального информационного пространства, явившаяся результатом повсеместного внедрения и использования ИИ, в том числе для класса задач цифровизации государственного управления, стала ключевым фактором развития современного общества и предопределила основные направления влияния ИИ на геополитику и безопасность. Среди этих направлений наибольшего внимания заслуживают следующие:

1. *Технологическая гонка и экономическое доминирование.* ИИ и машинное обучение являются основой четвертой промышленной революции. Страны, лидирующие в разработке и внедрении технологий ИИ (США, Китай, ЕС) в транспорт, промышленность, здравоохранение, энергетику, экологию и другие сферы, усиливают свое геополитическое и экономическое влияние. Например, контроль над платформами ИИ, такими как ChatGPT или системы автономного транспорта, позволяет диктовать свои ИКТ-стандарты и формировать глобальные цепочки добавленной стоимости. При этом увеличивается технологический разрыв между цифровыми гигантами и развивающимися странами, что провоцирует новые формы колониализма данных и цифрового неравенства, и, как следствие, приводит к новым всплескам геополитической напряженности.

2. *Военная революция.* ИИ кардинально революционизирует военную сферу в части изменения тактики ведения войн и стратегии обеспечения безопасности, создавая новые виды информационного оружия и автономные системы управления. Современные армии активно интегрируют ИИ в свои системы управления, связи, разведки и кибербезопасности. Автономные боевые дроны, алгоритмы целеуказания, адаптивные вредоносные программы, нейросетевые боты и алгоритмы манипуляции общественным мнением (дезинформации), системы ИИ для анализа больших данных в реальном времени являются эффективными инструментами гибридных войн. Это приводит к изменению баланса сил и создает новые потенциальные угрозы, связанные с возможностью несанкционированного использования автономного оружия и кибер-атаками на объекты критических инфраструктур (энергосети, промышленные предприятия, банки, элементы системы жизнеобеспечения и т.п.). Кроме того, потенциал применения ИИ в качестве такого кибероружия демонстрирует возможность глубокой информационной экспансии.

3. *Глобальная уязвимость критических инфраструктур.* Зависимость от цифровых систем делает государства крайне уязвимыми. Киберпространство становится ареной новых форм конфликтов. ИИ активно используется для создания сложных кибератак, манипуляции информацией и дезинформации. Атаки на объекты энергетики (например, взлом украинской энергосистемы в 2015–2016 гг.) или системы здравоохранения (кибератаки во время пандемии COVID-19) показывают, что даже локальные инциденты могут спровоцировать глобальные кризисы. ИИ-алгоритмы, управляющие умными городами или логистическими сетями, становятся мишенями для террористических групп и враждебно настроенных государств. Социальные сети и медиаплатформы, управляемые алгоритмами

ИИ, могут использоваться для влияния на общественное мнение и политические процессы в других странах. Это делает информационную безопасность одним из ключевых приоритетов для внешней политики всех государств без исключения.

4. *Этические и правовые вызовы и дилеммы.* Внедрение ИИ ставит перед обществом сложные этические и правовые вопросы. Автономные системы, принимающие решения без участия человека (например, проекты DARPA в США), могут привести к непредсказуемым последствиям. При этом остается открытым вопрос об ответственности за ошибки ИИ и возможные риски несанкционированной эскалации конфликтов. Кроме того, использование ИИ для массового сбора и анализа данных, слежки (скрытого наблюдения) и контроля за поведением граждан вызывает опасения относительно нарушения прав человека и приватности, создавая предпосылки для цифрового тоталитаризма.

5. *Глобальное регулирование и национальный суверенитет.* Отсутствие единых международных норм и прозрачных правил использования ИИ-решений усугубляет риски для глобальной безопасности и может привести к эскалации конфликтов и нестабильности мирового порядка. Особенно остро это проявляется в военно-политической сфере. При этом известны инициативы, как «Рекомендации по этичному ИИ» ОЭСР или регламент ЕС по искусственному интеллекту (AI Act), которые пытаются установить такие общие правила, но сталкиваются с сопротивлением ведущих стран, видящих в регулировании угрозу своему технологическому суверенитету (например, Китай и Россия). Тем не менее необходимо продолжать планомерную работу по разработке международных соглашений, регулирующих использование ИИ в военных целях, защиту обрабатываемых ИИ персональных данных, а также предотвращение кибератак, осуществляемых посредством ИИ-алгоритмов.

Наиболее радикальные изменения происходят в военной сфере. ИИ значительно расширяет боевые возможности традиционных вооружений, средств радиоэлектронной борьбы и военной техники. ИИ позволяет качественно изменять возможности разведки и связи, многократно увеличивать скорости обработки информации и принятия решений, что позволяет перейти к новым методам управления войсками, видам оружия и автономным системам вооружений на всех уровнях – стратегическом, оперативном и тактическом. Кроме того, применение ИИ в военном деле ведет к изменению форм и способов ведения боевых действий, а также к изменению самой парадигмы вооруженной борьбы [4]. Обладание ИИ в военной сфере обеспечивает значительное военное преимущество. Информационно-психологические параметры противостояния государств будут доминировать над ядерными. ИИ является мощным дестабилизирующим фактором, нарушающим военно-стратегическое равновесие и баланс сил, т.е. может служить как фактором политического давления, так и фактором сдерживания [5].

С точки зрения влияния цифровизации и ИИ на военную область можно выделить следующие наиболее общие тенденции [4, 6]:

1. *Становление гражданского общества.* В развитых демократических странах гражданское общество играет ключевую роль в определении политики, в том числе и в военной сфере. Гражданское общество не приемлет военные решения, связанные с большими людскими потерями. Использование военной силы становится все сложнее, и системы ИИ могут помочь снизить риски для личного состава.

2. *Глобализация и экономическая интеграция.* Глобальная экономика требует надежного обеспечения безопасности и стабильности, и военные конфликты между развитыми странами практически исключены. Основными средствами решения проблем стали экономическая и культурная экспансии, санкции и угроза применения силы, где это не грозит серьезными потерями. В этом контексте системы ИИ могут использоваться для экономической разведки и кибератак.

3. *Повышение уязвимости инфраструктуры.* Нарушение нормального функционирования критически важных объектов и инфраструктур государства может привести к кризисам и чрезвычайным ситуациям, что, в свою очередь, влечет за собой утрату жизненно важных функций общества и наносит ущерб его отдельным индивидам. Системы ИИ способны защитить критические инфраструктурные объекты, но также могут быть использованы для деструктивного воздействия и целенаправленных атак на них.

4. *Информационно-технический прогресс в военном деле.* Развитие вооружений и военной техники на основе ИИ приводит к увеличению точности, дальности и мощности действия, а также к улучшению получения разведывательных данных, систем обработки и анализа информации, собираемой автоматизированным способом из различных источников, в том числе не являющихся общедоступными.

Эти тенденции, по сути, определяют допустимые пределы и условия применения силы развитыми странами и возможные типы международных конфликтов.

Опыт последних десятилетий и уроки истории показывают, что развитые страны применяли силу только при подавляющем военно-техническом превосходстве. Для развитых стран никакая война с применением ядерного оружия неприемлема. Проблематичным является и развязывание широкомасштабных войн с применением обычного оружия против противника, который способен оказать серьезное сопротивление, чреватое для агрессора большими людскими потерями и серьезным ущербом критическим инфраструктурам. Так, в современных условиях ИИ становится наиболее приемлемым военным средством решения внешнеполитических проблем, в частности, путем развязывания информационных войн, особенно против экономически развитых стран.

Новые вызовы и угрозы безопасности

Процессы глобальной цифровизации и развития ИИ привели к тому, что общество стало зависимым от состояния своей критической информационной инфраструктуры. Это делает его уязвимым для опосредованного деструктивного воздействия враждебно настроенных стран-агрессоров и террористических организаций посредством вторжения и нанесения ущерба суверенному информационному пространству. Поэтому обеспечение безопасности и устойчивости информационной инфраструктуры и связанных с ней критически важных инфраструктурных систем является приоритетной задачей государственной политики [7, 8]. Для решения этой задачи согласно исследованиям [4, 9] необходима разработка единой стратегии противодействия угрозам информационного влияния и кибертерроризма с использованием технологий ИИ, в соответствии с которой функции силовых ведомств должны быть четко распределены, а действия согласованы на всех уровнях государственного управления. При этом важно понимать, что любые мероприятия по борьбе с кибертерроризмом могут в той или иной степени ограничивать свободу информации и нарушать права граждан. Это обстоятельство требует поиска баланса между безопасностью и свободой.

Современные тенденции цифровизации и широкое внедрение систем ИИ создают не только новые возможности, но и формируют вектор угроз для общественной, региональной и глобальной безопасности. К основным видам угроз можно отнести следующие:

1. Кибертерроризм, ориентированный на парализацию критически важных функций энергетических, транспортных, финансовых и других типов инфраструктурных объектов и систем жизнеобеспечения посредством реализации целенаправленных деструктивных воздействий.
2. Дестабилизация и поляризация общественных отношений за счет использования алгоритмов ИИ и нейросетевых ботов для целенаправленного распространения дезинформации и манипуляции общественным мнением через социальные сети и медиаплатформы (генерация фейков и недостоверного контента, влияние на выборы и т.п.), что является катализатором конфликтов и разногласий в обществе, а также повышает социальную напряженность.
3. Риски непредсказуемой эскалации конфликтов в социально-экономической или военно-политической сфере по причине отказов или намеренного нарушения нормального функционирования автономных роботизированных систем гражданского или военного назначения.
4. Угрозы экономической безопасности, включающие сокращение рабочих мест и повышение уровня безработицы по причине массового внедрения ИИ и средств роботизации во все сферы хозяйственной деятельности; монополизацию технологий, когда концентрация технологий ИИ в руках нескольких корпораций или стран создает дисбаланс в мировой экономике; рост финансовых рисков при использовании ИИ для манипуляций на финансовых рынках, мошенничества, отмывания денег и развития теневой экономики.
5. Риски дискриминации и несправедливых решений вследствие ошибок в данных или алгоритмах, на которых построены системы ИИ.
6. Угрозы приватности, обусловленные массовым сбором и анализом персональных данных субъектов информационного обмена и взаимодействия.
7. Цифровой разрыв, т.е. неравномерное распределение технологий ИИ между развитыми и развивающимися странами, что усиливает глобальное неравенство, а зависимость от технологий повышает риск потери суверенитета стран, которые зависят от иностранных технологий и платформ.
8. Угрозы экологической безопасности, связанные с высоким энергопотреблением центров обработки данных и систем ИИ, а также использованием ИИ для эксплуатации природных ресурсов без учета долгосрочных последствий, что в совокупности может усугубить экологические проблемы и привести к снижению устойчивости экосистем.

9. Трансграничные угрозы, возникающие по причине потенциального использования систем ИИ международными террористическими группировками для планирования атак, вербовки, пропаганды, дезинформации и манипуляции поведением людей.

Перечень перечисленных угроз не является исчерпывающим и может быть расширен с учетом появления новых вызовов безопасности и тенденций развития ИИ. Противодействие этим угрозам требует слаженной работы и сотрудничества на всех уровнях государственного управления, результатом чего должно стать создание доверенной среды функционирования и использования технологий и систем ИИ, а также разработка и реализацию превентивных и реактивных мер по обеспечению ее безопасности и устойчивого развития. Учитывая текущие широкие возможности ИИ вкупе с многоаспектностью проблем применения и внедрения ИИ, эта задача еще далека от окончательного решения.

Новые возможности и направления использования

Стремительное развитие технологий ИИ уже сегодня обеспечило новые возможности для общественного прогресса и технологическую основу цифровой зрелости для нынешнего и будущих поколений. Важными достижениями в этой области, прогрессирующими с каждым днем, являются:

- *ускорение темпов развития во всех сферах хозяйственной деятельности.* ИИ позволяет автоматизировать и оптимизировать научные исследования, производственные процессы, разработку инновационных товаров и услуг, социокультурное взаимодействие, расширяя информационный обмен за счет генерации, интеграции и распространения новых знаний. ИИ сокращает общее время на поиск, обработку и анализ проблемно-ориентированной информации, что играет важную роль в повышении эффективности процессов принятия управленческих решений и в удовлетворении информационных потребностей цифрового общества;

- *появление новой научной парадигмы.* Теория и практика ИИ дали импульс зарождению и развитию новой научной парадигмы – «Формирующего сверхразумного интеллекта», основанной на конвергенции когнитивных, цифровых и природоподобных технологий, что обеспечивает более глубокое понимание взаимосвязей и закономерностей мироздания, а также разнообразия системных проблем и путей их разрешения [10], что крайне необходимо современному обществу для целостного восприятия и интерпретации глобальных рисков. За счет возможности анализа больших объемов разнотипной информации такой ИИ позволяет находить как предсказуемые (поддающиеся нормальной логике), так и нестандартные решения для общих насущных проблем человечества;

- *ускорение интеграционных процессов.* ИИ способствует глобализации и регионализации, что выражается в унификации цифровых инструментов обмена данными и знаниями для объединения экономических и технологических возможностей всех субъектов мирового сообщества в различных областях, включая науку, образование, бизнес, международные отношения и культуру. Такая ИИ-интеграция во многом облегчает коммуникацию между акторами и согласование их интересов для достижения целей устойчивого развития;

- *разрушение барьеров и трансграничность.* ИИ предоставляет возможности по созданию равных условий для научно-технологического развития различных регионов, преодолевая географические и экономические барьеры в направлении сокращения цифрового разрыва;

- *инновационные методы обеспечения безопасности.* ИИ позволяет создавать и внедрять новые средства превентивного и ситуационного управления региональной, национальной и глобальной безопасностью, учитывающие новые виды угроз и потенциальные вызовы;

- *совершенствование управления.* ИИ обеспечивает основу для разработки новых форм и механизмов организационного управления и информационно-аналитической поддержки в военной, производственной, социальной и внешнеполитической сферах, повышая общую эффективность и оперативность принятия решений, причем информационное управление, которое часто отождествляется с воздействием «мягкой силой», выходит на первый план.

Эти достижения обусловили и сформировали современные тенденции цифровизации общества на базе технологий ИИ, которые охватывают широкий круг отраслей экономики и управления и активно влияют на глобализационные процессы. В частности, можно выделить такие перспективные направления применения ИИ, как:

1. RPA (Robotic Process Automation) автоматизация и оптимизация бизнес-процессов, предполагающая использование инструментов ИИ для автоматизации рутинных задач по оперативной обработке больших данных, управлению документооборотом и обслуживанием клиентов, а также внедрение построенных на основе ИИ цифровых двойников (Digital Twins) – интеллектуальных робототехнических систем, способных обучаться и адаптироваться к изменениям в бизнес-процессах.

2. Машинное обучение (Machine Learning) и глубокое обучение (Deep Learning), предназначенные для решения различных классов задач: анализ больших данных, компьютерное зрение, обработка естественного языка, генерация контента в креативных индустриях, прогнозирование и принятие решений с использованием нейронных сетей:

- обработка естественного языка NLP (Natural Language Processing) используется в разработке чат-ботов и виртуальных ассистентов, в анализе текстовых данных для извлечения смыслов, классификации и генерации текстов, автоматическом реферировании документов в реальном времени т.д.;

- компьютерное зрение нацелено на распознавание изображений и видео при решении задач обеспечения общественной безопасности, промышленного производства, медицинской диагностики, управления автономными транспортными средствами, розничной торговли и т.д.

3. Интеграция ИИ с устройствами Интернета вещей (IoT) для задач анализа данных в реальном времени, прогнозирования и управления системами, например, умные дома, города и промышленные системы (Industry 4.0).

4. Персонализация и рекомендательные системы, ориентированные на использование ИИ в задачах анализа поведения пользователей и для предоставления персонализированных рекомендаций в таких областях, как маркетинг, электронная коммерция и образование.

5. Телемедицина и диагностика заболеваний с использованием ИИ, предполагающая применение виртуальных медицинских программ-ассистентов для анализа медицинских изображений, создания и выбора персонализированных методов лечения и прогнозирования результатов лечения.

6. Беспилотные транспортные системы, работа которых основана на алгоритмах ИИ, обеспечивающих навигацию и управление автономными транспортными средствами в реальном времени и в условиях неполной определенности исходных данных.

7. Применение ИИ в сфере обеспечения кибербезопасности для задач обнаружения аномалий, предотвращения кибератак и анализа угроз, а также автоматизации процессов мониторинга и реагирования на инциденты.

8. Интеграция ИИ с облачными платформами для масштабируемости и доступности информационных сервисов, решения задач распределенных вычислений, предоставления AIaaS-услуг (AI-as-a-Service – ИИ как сервис).

9. Интеграция ИИ и квантовых вычислений для ускорения работы алгоритмов ИИ и расширения возможностей квантовых компьютеров для решения сложных задач, которые недоступны для классических компьютеров.

Указанные направления развития ИИ демонстрируют, как технологии ИИ становятся неотъемлемой частью глобальной цифровизации мира, трансформируя различные отрасли в надежде принципиально повысить качество жизни населения планеты. Однако, несмотря на уже накопленный за последние десятилетия опыт применения ИИ в научно-образовательной, производственной, правоохранительной, управленческой и других сферах, такая цифровая трансформация сопряжена с определенными рисками для всего общества. Одной из главных проблем, порождаемых генеративным ИИ, является формирование автоматизированного, лишенного правды общества, неспособного учиться и принимать решения самостоятельно [6]. Поэтому очень важно учитывать социальные последствия и морально-этические аспекты при внедрении систем и технологий ИИ в реальную действительность.

Заключение

Резюмируя, следует отметить, что на текущем этапе развития общества ИИ является одним из ключевых факторов геополитической конкуренции, который, как подчеркивается в работе [11], необходимо учитывать при обеспечении технологического суверенитета, национальных интересов и безопасности нашей страны. Анализ сфер применения ИИ показал, что его внедрение создает как новые возможности для технологического роста и социально-экономического развития, так и глобальные риски, вызывающие серьезную озабоченность и требующие комплексного междисциплинарного подхода к решению задач обеспечения национальной безопасности и международного сотрудничества по всему спектру вопросов ИИ-ориентированной цифровизации экономики и управления и совместного использования для этих целей единой критической информационной инфраструктуры. ИИ способен определенным образом повлиять на глобальную политическую повестку в направлении повышения качества жизни общества, но экзистенциальные угрозы, такие как искусственно созданные пандемии, ядерная война, конфликт ведущих держав, кибератаки на критические инфраструктуры, при масштабном цифровом реформировании для всего человечества все равно будут неизбежны. В новой реальности уровень национальной безопасности страны уже зависит не только от военной

мощи и ресурсов государства, но и от его способности контролировать информационные технологии, сети и потоки данных на глобальном уровне.

В настоящее время в мире преобладает тренд на развитие ИИ. Ведущие мировые державы, активно внедряющие ИИ, ведут комплексные междисциплинарные исследования в этой области. Результаты этих исследований находят широкое применение во всех сферах общественной жизни, включая военную, что обеспечивает им значительные преимущества в способности более результативно решать самые актуальные задачи по защите и устойчивому развитию своих суверенных территорий, а также по обеспечению социально-экономической безопасности на национальном и международном уровне. В нашей стране за две трети века создан значительный научный задел в области технологий ИИ, включая средства анализа больших данных, методы машинного обучения, распознавания изображений и когнитивного моделирования. Поэтому для России критически важно не только не отставать в гонке за ИИ, развивая собственные доверенные технологии ИИ, но и активно участвовать в процессах международно-правового регулирования применения ИИ путем формирования глобальных правил поведения реальных и виртуальных акторов систем ИИ, этических принципов и технических стандартов для реализации технологий ИИ на практике, чтобы минимизировать для себя возможные риски и максимизировать полезные эффекты от перехода к новой модели цифровой трансформации. Последнее предполагает не только постоянное развитие и совершенствование национальной стратегии ИИ [12], но и существенные инвестиции в ИИ – научные исследования проблем ИИ, образование и проекты по созданию эффективных мер и систем обеспечения безопасности объектов критической информационной инфраструктуры страны. Приоритетной задачей в этом русле является также реализация программ подготовки и переподготовки квалифицированных кадров для цифровой трансформации экономики и управления на основе технологий ИИ.

Стоит отметить, что для успешного широкого внедрения технологий ИИ во все сферы общественной жизни государственная политика в сфере информационно-коммуникационных технологий должна быть адаптивной к любым социальным, экономическим и политическим изменениям, вызванным последствиями применения ИИ, а также обеспечивать парирование возникающих при этом многофакторных угроз и вызовов. Это необходимо для поддержания баланса между экономическим развитием страны, социальной стабильностью и этическими нормами технократизации на национальном и международном уровне. При этом достижение целей устойчивого развития за счет применения ИИ ограничивается лишь доступностью и достоверностью исходных данных, трудоемкостью анализа больших объемов разноплановой информации, точностью прогнозирования и адекватностью поведения акторов. Вместе с тем перспективное влияние технологий ИИ на цели устойчивого развития нельзя недооценивать. Таким образом, опираясь на цели устойчивого развития и концепцию приемлемого риска, можно заключить, что будущее принадлежит тем, кто сможет превратить ИИ в инструменты созидания, а не в средства гибридных войн, направленных на нарушение мирового порядка и стабильности.

Список литературы

1. Концепция внешней политики Российской Федерации : указ Президента РФ № 229 от 31.03.2023. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49090>
2. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2036 г. : указ Президента РФ № 309 от 07.05.2024. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/73986>
3. Зеленская Т. Е. Геополитический аспект информатизации. 2010. URL: https://upload.pgu.ru/iblock/701/uch_2010_xiv_00018.pdf
4. Цыгичко В. Н. Геополитические последствия информатизации и новые вызовы безопасности // Информационное общество. 2002. Вып. 1. С. 19–22.
5. Раскин А. В. Информатизация и ее влияние на характер вооруженной борьбы // Стратегическая стабильность. 2013. № 4. С. 2–5.
6. Международная безопасность в эпоху искусственного интеллекта : учебник для вузов / под ред. М. В. Захаровой, А. И. Смирнова : в 2 т. М. : Аспект Пресс, 2024. Т. 1. 401 с.
7. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации : указ Президента РФ № 400 от 02.07.2021. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046/page/1>
8. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С., Смолян Г. Л. Безопасность критических инфраструктур. М. : УРСС, 2019. 200 с.
9. Черешкин Д. С., Ройзензон Г. В., Бритков В. Б. Применение методов искусственного интеллекта для анализа риска в социально-экономических системах // Информационное общество. 2020. № 3. С. 14–24.
10. Алексеева И. Ю. Информационные вызовы национальной и международной безопасности / под общ. ред. А. В. Федорова, В. Н. Цыгичко. М. : ПИР-Центр, 2001. 328 с.

11. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента РФ № 145 от 28.02.2024). URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/HHNAzTI1guvX9Y00yaFA4KkMWPYcWS8.pdf>
12. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года (в ред. Указа Президента РФ № 124 от 15.02.2024 г.). URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/AH4x6HgKWANwVtMOfPDhcbRpvd1HCCsv.pdf>

References

1. *Kontseptsiya vneshney politiki Rossiyskoy Federatsii: ukaz Prezidenta RF № 229 ot 31.03.2023 = The concept of the foreign policy of the Russian Federation : Decree of the President of the Russian Federation No. 229 dated 03/31/2023.* (In Russ.). Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49090>
2. *O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 g. i na perspektivu do 2036 g.: ukaz Prezidenta RF № 309 ot 07.05.2024 = On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2036: Decree of the President of the Russian Federation No. 309 dated 05/07/2024.* (In Russ.). Available at: <http://kremlin.ru/events/president/news/73986>
3. Zelenskaya T.E. *Geopoliticheskiy aspekt informatizatsii = The geopolitical aspect of informatization.* 2010. (In Russ.). Available at: https://upload.pgu.ru/iblock/701/uch_2010_xiv_00018.pdf
4. Tsygichko V.N. The geopolitical consequences of informatization and new security challenges. *Informatsionnoe obshchestvo = Information Society.* 2002;(1):19–22. (In Russ.)
5. Raskin A.V. Informatization and its influence on the nature of the armed struggle. *Strategicheskaya stabil'nost' = Strategic stability.* 2013;(4):2–5. (In Russ.)
6. Zakharova M.V., Smirnov A.I. (eds.). *Mezhdunarodnaya bezopasnost' v epokhu iskusstvennogo intellekta: ucheb-nik dlya vuzov: v 2 t. = International security in the era of artificial intelligence : a textbook for universities : in 2 vol.* Moscow: Aspekt Press, 2024;1:401. (In Russ.)
7. *Strategiya natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii: ukaz Prezidenta RF № 400 ot 02.07.2021 = National Security Strategy of the Russian Federation : Decree of the President of the Russian Federation No. 400 dated 07/02/2021.* (In Russ.). Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046/page/1>
8. Tsygichko V.N., Chereskin D.S., Smolyan G.L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur = Safety of critical infrastructures.* Moscow: URSS, 2019:200. (In Russ.)
9. Chereskin D.S., Royzenzon G.V., Britkov V.B. Application of artificial intelligence methods for risk analysis in socio-economic systems. *Informatsionnoe obshchestvo = Information Society.* 2020;(3):14–24. (In Russ.)
10. Alekseeva I.Yu. *Informatsionnye vyzovy natsional'noy i mezhdunarodnoy bezopasnosti = Information challenges to national and international security.* Moscow: PIR-Tsentr, 2001:328. (In Russ.)
11. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii: ukaz Prezidenta RF № 145 ot 28.02.2024) = Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation : Decree of the President of the Russian Federation No. 145 dated 02/28/2024).* Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/HHNAzTI1guvX9Y00yaFA4KkMWPYcWS8.pdf>
12. *Natsional'naya strategiya razvitiya iskusstvennogo intellekta na period do 2030 goda (v red. Ukaza Prezidenta RF № 124 ot 15.02.2024 g.) = National Strategy for the Development of Artificial Intelligence for the period up to 2030 (ed. Decree of the President of the Russian Federation No. 124 dated 02/15/2024).* (In Russ.). Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/AH4x6HgKWANwVtMOfPDhcbRpvd1HCCsv.pdf>

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник лаборатории
информационных технологий управления
техногенно-природными системами,
Институт информатики и математического
моделирования имени В. А. Путилова
Федерального исследовательского центра «Кольский
научный центр Российской академии наук»;
главный научный сотрудник,
Институт проблем промышленной экологии Севера
Федерального исследовательского центра «Кольский
научный центр Российской академии наук»
(Россия, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher of the laboratory of information
technologies for industrial-natural system
management,
Putilov Institute for Informatics and Mathematical
Modeling of the Federal Research Center "Kola
Science Center of the Russian Academy of Sciences";
chief researcher,
Institute of North Industrial Ecology Problems
of the Federal Research Center "Kola Science Center
of the Russian Academy of Sciences"
(14 Fersmana street, Apatity, Murmansk region,
Russia)

Виталий Николаевич Цыгичко

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт системного анализа
Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9)
E-mail: vtsygichko@inbox.ru

Vitaliy N. Tsygichko

Doctor of technical sciences, professor, chief researcher,
Institute for System Analysis of the Federal Research
Center «Computer Science and Control»
of the Russian Academy of Sciences
(9 60-letiya Oktyabrya avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 24.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 18.11.2024

Принята к публикации/Accepted 18.12.2024

ДАЙДЖЕСТ СТАТЕЙ ЗА 2024 г.
(краткий обзор публикаций научного журнала
«Надежность и качество сложных систем»)

Валентин Васильевич Миронов, д.ф.-м.н, профессор

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина

Журнал «Надежность и качество сложных систем» представляет научные исследования в области надежности и качества сложных систем. Научный интерес журнала охватывает широкий спектр проблем теории надежности качества систем. Приоритетной задачей журнала является также развитие международного сотрудничества в области теории надежности и управления качеством.

Приведем краткое содержание (дайджест) статей за 2024 г. в соответствии с рубриками журнала. Прядок представления статей таков: рубрика журнала, номер журнала за 2024 год, автор публикации, название статьи, номера страниц статьи в данном номере, число библиографических ссылок (из них на английском языке), краткое содержание статьи.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

№ 1 (45)

А. Н. Якимов

**Универсальная модель излучения
микроволновой антенны**

Характеристики направленности микроволновых антенн определяются функциональным назначением радиотехнических систем, в составе которых они используются. Заданные характеристики антенн могут обеспечиваться формированием в их апертуре как синфазных, так и переменного-фазных распределений источников возбуждения (токов или полей), имеющих специфику математического описания. Построение универсальной математической модели, адекватно описывающей излучение антенн с разным видом распределений источников возбуждения, позволит расширить возможности решения задачи проектирования микроволновых антенн заданными характеристиками направленности.

О. В. Абрамов

**Дестабилизирующие факторы и случайные
процессы изменения параметров
технических устройств и систем**

Выполнен анализ дестабилизирующих факторов и случайных процессов деградации параметров технических устройств и систем как причины параметрических отказов.

А. И. Годунов, П. С. Суздальцев,

А. А. Жежук, А. Г. Избасов,

А. М. Мухамбетов, Н. К. Юрков

**Математическая модель полета
беспилотного летательного аппарата**

Применение и актуальность использования беспилотных систем в настоящее время не вызывает никаких сомнений, работа в этом направлении ведется постоянно, соответственно, и растут возможности беспилотных аппаратов.

Г. С. Садыхов, С. С. Кудрявцева,

В. М. Дубровин

**Признаки сходимости и расходимости
интегралов ресурса невосстанавливаемых
технических объектов**

При выборе математической модели надежности невосстанавливаемых технических объектов заранее надо знать условия, при которых средний ресурс конечен и когда бесконечен. Поэтому актуальная задача – найти признаки сходимости и расходимости интегралов ресурса.

В. Б. Морозов, М. А. Морозова

О методах оценки интенсивности отказов оборудования для вероятностного анализа безопасности проектируемой АЭС при объединении данных от различных источников

Для получения разрешения на строительство и ввод в эксплуатацию блоков АЭС требуется представить в Ростехнадзор вероятностный анализ безопасности спроектированного блока. Оценки интенсивностей отказов элементов такого блока могут быть получены только на основе объединения эксплуатационной информации по действующим блокам-аналогам. Указанная задача требует разработки специальных методов, учитывающих неоднородность объединяемых данных.

№ 2 (46)

М. Ю. Звездочкин, В. В. Миронов

Методы повышения быстродействия декодирования потоковых данных на основе кода Рида – Соломона

Декодирование информации с использованием помехоустойчивых кодов Рида – Соломона является весьма ресурсоемкой задачей в части организации вычислений. Особенно эта проблема актуальна при декодировании измерительной информации и видеопотоков на лету, в режиме времени, близком к реальному.

Л. Г. Сушков

Проблема новых свойств чисел

Предлагаемая работа посвящена исследованиям по уточнению аксиоматизации арифметики в связи с наличием в ней специальных допущений. Сформулирована концептуальная проблема анализа новых свойств чисел в предположении возможности утери какой-либо исходной посылки.

*А. И. Годунов, С. А. Куканов,
П. С. Суздальцев, А. М. Мухамбетов*
Математическая модель системы управления квадрокоптером

Рассматривается управление беспилотным летательным аппаратом-квадрокоптером.

№ 3 (47)

*Б. Ш. Собиров, Т. Т. Карамергенов,
Н. А. Северцев, Н. К. Юрков*
Квантовые технологии – глобальный вызов, требующий очередной революции методов обработки и передачи информации

Актуальность исследования обусловлена тем, что сегодня один из наиболее серьезных фундаментальных вызовов для технологических компаний – это то, что потребности в вычислительных мощностях постоянно растут. Бизнес-среда все быстрее приближается к новой вычислительной парадигме. Одним из ответов на этот вызов могут стать квантовые технологии. Цель исследования – оценка текущего состояния квантовых вычислений и определение направления развития этого направления, а также препятствий и ограничений применения квантовых технологий.

А. И. Иванов, А. И. Ермакова
Оценка качества работы многокритериального нейросетевого статического анализа на примере проверки гипотезы независимости данных малых выборок

Целью статьи является создание критерия качества оценки эффективности нейросетевой обработки малых выборок при многокритериальной проверке гипотезы независимости.

А. И. Годунов, С. А. Куканов, Д. В. Бакланов
Физические особенности процессов деформации и разрушения материала методов конечных узлов

Изучены деформации и разрушение материала композитной гильзы в области контакта двух различных материалов (стали и полиамида) с помощью математической модели разрывного метода Галеркина. Особенностью исследования является то, что данный метод сохраняет массовые и кинетические характеристики в узлах модели, разрушение происходит при достижении предела текучести. Также для адекватного описания разрушения для каждого материала задано уравнение состояния вещества по Ми – Грюнейзену.

Г. С. Макеева
Моделирование управляемости характеристик решеток плазмонных графеновых наноантенн в среднем инфракрасном диапазоне

Внедрение наноантенн для оптической беспроводной связи в инфракрасном (ИК) и видимом диапазонах обеспечивает более высокую скорость передачи данных при уменьшении размера антенны. Возможность перестройки характеристик графена химическим легированием или напряжением смещения актуальна при разработке реконфигурируемых наноантенн. Целью работы является исследование характеристик (S-параметров, диаграммы направленности (ДН)) решеток плазмонных графеновых наноантенн, их управляемости и возможности сканирования по частоте при изменении химического потенциала графена (приложением внешнего электрического поля) в среднем ИК-диапазоне.

И. Е. Старостин
Метод математического прототипирования энергетических процессов как инструмент синтеза математического ядра цифровых двойников различных физико-химических систем

Цифровой двойник по своей сути представляет собой цифровую копию объекта, благодаря непрерывному обмену данными с объектом воспроизводящую актуальное его состояние. Это достигается путем применения в качестве математического ядра цифрового двойника математической модели, основывающейся на реальном поведении объекта, параметры которой обновляются в соответствии с актуальной информацией, получаемой с объекта. Для построения моделей систем различной физической и химической природы авторами был предложен метод математического прототипирования энергетических процессов, основывающийся на методах современной неравновесной термодинамики, механики, электродинамики. Благодаря чему упомянутый метод позволяет создать модели динамики процессов в системе, не противоречащие общим физическим законам, а также особенностям протекания процессов в конкретной физической или химической системе. Затем полученные модели преобразовываются к моделям систем, применимых для решения практических задач, с точностью до определяемых из экспериментальных данных постоянных коэффициентов. Однако здесь актуальным является вопрос

М. О. Тимошкин, Е. Г. Романова

**Применение нейросетевых алгоритмов
глубокого обучения для классификации
опухолей головного мозга**

выбора базиса, в котором строится преобразованная модель рассматриваемой системы и выбора алгоритма обучения предложенной модели. Решению приведенных вопросов посвящена настоящая работа.

Глубокое обучение – это активно развивающаяся область машинного обучения, которая позволяет находить зависимости в слабоструктурированных данных. Актуальность работы заключается в том, что в настоящее время автоматическая классификация типов тканей играет важную роль в компьютерной диагностике. Цель работы заключается в автоматизации процесса определения вида опухоли головного мозга по ее изображению с помощью методов глубокого обучения.

№ 4 (48)

А. И. Дивгеев, Е. А. Софронова

**Решение уточненной задачи оптимального
управления с помощью универсальной
системы стабилизации**

Рассматривается уточненная постановка задачи оптимального управления, решение которой в отличие от классической постановки может быть непосредственно реализовано в реальном объекте. Для этой цели в задачу оптимального управления включена задача синтеза системы стабилизации движения объекта по оптимальной траектории, которая получена в результате решения классической задачи оптимального управления.

Е. Ю. Шмалько

**Машинное обучение систем управления
с обратной связью на базе принципа
синтезированного оптимального управления**

В стремлении к автоматизации различных процессов жизнедеятельности для повышения их качества очевидной становится необходимость автоматизировать и сам процесс автоматизации, т.е. разработки систем управления, чтобы сделать его быстрым и универсальным. Это звучит особенно актуально в условиях всевозрастающей роботизации и появления разнообразных роботов в качестве объектов управления. Наиболее общей задачей робототехники является синтез управления с обратной связью. Она предполагает, что система управления, обеспечивающая достижение объектом цели, проектируется в зависимости от состояния объекта оптимально по заданным критериям. Задача синтеза является актуальной, но общих подходов к ее решению на сегодняшний день не существует. В данной работе предлагается инверсный подход к синтезу оптимальной системы управления с обратной связью на основе методов машинного обучения для получения реализуемых решений задачи оптимального управления.

В. Р. Роганов, В. В. Швыров

Статистические и семантические методы анализа тенденций в производстве, транспортировке и использовании водоугольного топлива

Рост количества публикаций по тематике производства и использования водоугольных суспензий обусловлен глобальным ростом энергопотребления, ростом цен на энергоносители, а также потребностями расширения топливной базы в современной энергетике. С другой стороны, интерес к данному направлению связан с вопросами утилизации накопившихся угольных отходов. В связи с этим становится актуальной задача систематизации и классификации предложенных различными авторами подходов в области эффективного использования водоугольных суспензий и водоугольного топлива.

И. В. Пешков, В. А. Жигулин,

Н. А. Фортунова

Моделирование процесса радиопеленгации цифровыми антенными решетками с учетом эффекта взаимного влияния антенных элементов

Эффект взаимного влияния антенных элементов способен оказывать существенное воздействие на характеристики сложных, чувствительных систем. Данный эффект изменяет форму диаграмм направленности антенных элементов, меняет их активное сопротивление, что усложняет согласование импедансов антенных решеток. В областях со строгими требованиями взаимодействие может оказать очень существенное влияние на результаты работы системы. В частности, они способны влиять на результаты работы цифровых алгоритмов оценки угловых координат источников радиоизлучения со сверхразрешением. Была поставлена следующая цель: разработать модель цифрового радиопеленгатора с учетом фактора взаимного влияния антенных элементов.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

№ 1 (45)

И. Е. Старостин

Построение на основе интерполяции моделей различных физических и химических систем методом математического прототипирования энергетических процессов

Решение практических задач (проектирования и эксплуатации систем) подразумевает построение математических моделей систем. Для математического моделирования систем различной физической и химической природы авторами был предложен метод математического прототипирования энергетических процессов, основывающийся на современной неравновесной термодинамике, механике и электродинамике. Упомянутый метод дает адекватные модели систем, т.е. не противоречащие общим физическим законам, а также особенностям протекания процессов в конкретной системе. Однако для определения контролируемых параметров системы по ее измеряемым параметрам из системы дифференциальных уравнений, полученных методом математического прототипирования, необходимо решать очень трудоемкую задачу идентификации большого числа параметров

*А. А. Павлов, А. Н. Царьков,
Ю. А. Романенко, И. И. Корнеев,
А. Ю. Романенко, М. И. Макеев,
Ф. А. Павлов*

**Формирование метода повышения
надежности специализированных ЭВМ**

этих уравнений. Одним из путей борьбы с трудоемкостью упомянутых задач идентификации является использование интерполяционных методов, что обуславливает актуальность задачи разработки методики построения моделей систем методом математического прототипирования энергетических процессов с использованием интерполяционных методов.

Разработка методического аппарата построения средств обеспечения требуемого уровня вероятности безотказной работы и живучести самовосстанавливаемых специализированных ЭВМ (СЭВМ). При проведении исследований осуществлен анализ условий эксплуатации и выбор показателей надежности для СЭВМ авиационно-космической техники. Сформулированы требования к методам резервирования СЭВМ. Проведена сравнительная оценка обнаруживающей способности и аппаратных затрат при реализации мажоритарного метода резервирования, метода дублирования и использования корректирующих кодов.

*Д. Н. Новомейский, М. Н. Пиганов,
А. А. Лупцов, В. П. Перевертов*

**Методика регулировки амплитудно-
частотных характеристик фильтров**

Актуальность темы данной работы обусловлена необходимостью снижения уровня проникающей помехи и повышения качества полезного сигнала, принимаемого бортовой станцией активных помех. Цель – улучшение качества и функциональных параметров бортовых частотно-избирательных систем и структур путем регулировки амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтров.

А. А. Ошкин, Д. Ф. Филиппов, А. И. Годунов
**Методика оценки эксплуатационной
безопасности боеприпасов
с малочувствительными к внешним
тепловым воздействиям взрывчатыми
составами**

Актуальность темы обусловлена ее практической значимостью для решения задач эксплуатационной безопасности боеприпасов, находящихся на объектах хранения, когда необходимо знать время взрыва изделий. Предложена разработанная аналитическая модель определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды (молнии и ландшафтного пожара).

В. Н. Китаев, Р. Л. Афанасьев, М. В. Петров
**Инерционный включатель
с гидравлическим демпфированием
инерционного тела**

Инерционные включатели используются в подвижных объектах для коммутации электрических цепей технических систем. Срабатывание подобных приборов происходит в основном при наборе интеграла линейного ускорения, с которым объект перемещается в пространстве. Для интегрирования линейного ускорения традиционно используются магнитоиндукционные и гидравлические демпферы. В ряде случаев гидравлические демпферы как упрощающие конструкции инерционных включателей более предпочтительны. В работе представлены результаты разработки конструкции инерционного

*В. Н. Китаев, Д. И. Сафонов, Е. В. Бабушкина,
Р. В. Спрогис, И. В. Родионов*

**Электромагнитный поляризованный
переключатель с бездребезговой контактной
системой**

включателя с гидравлическим демпфированием инерционного тела, приведена его математическая модель – составленные дифференциальные уравнения, описывающие движения подвижных конструктивных элементов, а также условия начала движения.

Электромагнитные поляризованные переключатели используются в технических объектах для коммутации электрических цепей их систем. Промышленностью выпускается значительная номенклатура подобных коммутирующих устройств, однако не все они могут быть применены в вышеуказанных объектах, в которых обычно имеются ограничения по массе и размерам используемых приборов и систем. Также зачастую от коммутирующих приборов требуется работа в высокоточных электрических цепях с предъявлением требований по исключению дребезга замкнутых контактов при ударных и вибрационных воздействиях. Срабатывание подобных приборов происходит при подаче напряжения на обмотки управления. Представлены результаты разработки электромагнитного поляризованного переключателя, обеспечивающего его применение в слабо- и высокоточных электрических цепях систем подвижных и стационарных технических объектов.

Т. И. Мурашкин, Е. А. Бадеева, В. А. Бадеев

**Конструктивно-технологическое решение
волоконно-оптического датчика
для экспресс-анализа качества
нефти и нефтепродуктов**

От качества нефтепродуктов зависят технические характеристики и работоспособность оборудования. Анализ состава нефтепродукта проводят, как правило, в лабораторных условиях с помощью оптических способов диагностики. Из оптических способов наибольшее распространение получили рефрактометрические способы определения состава нефти по коэффициентам преломления, которое изменяется при изменении химического состава. Основным недостатком известных методов анализа – это большое время проведения измерений, связанный с необходимостью отбора пробы из трубопровода. Для экспресс-анализа состава веществ запатентованы рефрактометрический способ и волоконно-оптический датчик для его реализации. Объектом исследования являются процессы экспресс-анализа качества нефти и нефтепродуктов. Предметом исследования являются научно-технические решения рефрактометрических волоконно-оптических датчиков качества нефтепродуктов. Целью работы является разработка конструктивно-технологического решения повышенной надежности для экспресс-анализа качества нефти и нефтепродуктов не только в лабораторных, но в сложных эксплуатационных условиях.

А. И. Власов, Г. А. Волков, К. В. Селиванов
Визуальные модели системной инженерии процессов процессов аддитивных технологий

Рассматриваются методики применения визуальных инструментов системной инженерии на примере процессов аддитивных технологий.

С. Г. Семенцов, А. А. Адамова
Усовершенствование встроенной схемы термокомпенсации пьезорезистивных датчиков давления

Рассматриваются интегральные пьезорезистивные преобразователи на базе монокристаллического кремния. Анализируется работа встроенной схемы термокомпенсации с дополнительными терморезисторами и особенности ее работы.

В. В. Головкин, О. М. Батищева, В. А. Папшев
Повышение робоспособности резбонарезного инструмента за счет использования ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы

Одним из перспективных направлений повышения эффективности механической обработки является внедрение качественно новых технологий, в частности, с использованием энергии ультразвука. Особенно эффективным оказалось применение вынужденных ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы в труднообрабатываемых материалах. В результате использования ультразвуковых колебаний имеет место повышение производительности, работоспособности резбонарезного инструмента, а также качества и точности получаемых деталей.

Н. В. Горячев, А. Г. Избасов, А. И. Мельничук, А. М. Мухамбетов, Н. К. Юрков
К проблеме синтеза системы противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) претерпели огромное развитие и в короткое время прошли большой путь совершенствования. Из-за относительно низкой цены и простоты использования дроны широко используются во многих областях как гражданского, так и специального применения. Например, они широко применяются в целях предотвращения потенциальных угроз общественной безопасности и личной неприкосновенности. Необходимо развернуть систему защиты от беспилотников в чувствительной зоне для того, чтобы определять координаты летящего БПЛА различными способами обнаружения.

В. Н. Китаев, Д. И. Сафонов, А. Е. Кирюнин, Е. К. Хованова
Технические решения компенсации температурной погрешности пороговых датчиков разности давлений с мембранным чувствительным элементом

Пороговые датчики разности давлений с мембранным чувствительным элементом ввиду их надежности находят широкое применение в технологическом оборудовании и технических системах для обеспечения требуемого избытка давления воздуха по сравнению с внешним атмосферным давлением в помещениях для спортивных мероприятий (быстро возводимых физкультурно-оздоровительных комплексах с надувным перекрытием), в чистых технологических помещениях с нормируемым содержанием в воздухе пыли, микроорганизмов, аэрозольных частиц и химических паров. Датчики подобного типа для обеспечения необходимых технических характеристик требуют: высокой герметичности сварных соединений элементов

А. А. Адамова, С. Г. Семенцов, А. В. Бецков
**Исследование встроенной схемы
 термокомпенсации пьезорезистивных
 датчиков давления**

конструкции; применения высокогерметичных металлоглазанных спаев; применения гофрированных мембран из материалов, обеспечивающих высокую чувствительность и высокую электропроводность.

Рассматриваются интегральные пьезорезистивные преобразователи на базе монокристаллического кремния. Одной из основных причин, приводящих к погрешностям пьезорезистивных преобразователей, является их чувствительность к изменению температуры. Поиск решений для снижения температурных погрешностей измерений является актуальной задачей.

А. И. Мельничук
**Большие перспективы малых беспилотных
 летательных аппаратов**

В настоящее время идет работа по усовершенствованию малой беспилотной авиации, в том числе создание комплексов малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с сетевой организацией. Подобные системы должны эксплуатироваться небольшим коллективом непрофессионалов, что обеспечивается за счет особенностей построения данной системы.

*Д. С. Бояркин, Е. А. Асеев, Д. А. Голушко,
 И. Р. Абузьяров, А. В. Лысенко*
**Протокол регистрации технического
 обслуживания трубопроводной арматуры**

Рассмотрен способ регистрации проведения технического обслуживания и ремонта трубопроводной арматуры (ТОиР ТПА) с использованием технологии RFID (Radio Frequency Identification, радиочастотная идентификация). Предложенный способ позволяет упростить и автоматизировать процесс сбора сведений о времени проведения и содержании работ по ТОиР ТПА и таким образом усилить контроль за его осуществлением. Тем самым повышается надежность и безопасность эксплуатации оборудования. Обоснована необходимость регулярного и качественного ТОиР ТПА.

А. А. Адамова, Е. А. Медведева, С. Г. Семенцов
**Интеллектуальный уровнемер с визуальным
 отсчетом для жидкостей**

Представлено исследование и разработка датчика уровня для инновационной бутылки, предназначенной для систематического отслеживания уровня гидратации организма человека. Анализ спроса на существующие решения на рынке «умных» бутылок показывает, что рассматриваемые устройства не обладают функцией идентификации содержимого, вследствие чего может снизиться точность измерений и прогнозов относительно показателей здоровья пользователя.

*А. Ю. Дмитриевцев, Ю. Т. Зырянов,
 С. А. Нестерович, С. П. Хрипунов*
**Постановка задачи оценки технического
 состояния информационно-измерительных
 систем на основе формализованного
 описания знаний экспертов**

Актуальность работы обусловлена тем, что методы, применяемые в системе контроля и диагностирования, не в полной мере используют новые подходы с применением новых информационных технологий. Это происходит вследствие отсутствия возможности инструментальной оценки

некоторых технических характеристик и их значений. Данные характеристики принято называть признаками, так как невозможно определить их значение количественно. Целью работы является изучение возможности создания базы данных для системы контроля и диагностики, которая позволяла бы специалистам с недостаточным уровнем подготовки и знаний диагностировать и устранять сложные неисправности (системный сбой, нехарактерный отказ, «плавающий» дефект), в тех случаях, когда отсутствует возможность передачи опыта и знания более опытных сотрудников.

№ 3 (47)

*Е. А. Фокина, А. А. Трофимов, В. Н. Пономарев,
С. А. Здобнов*

Проектирование имитационной модели датчика температуры при воздействии критических температур и синусоидальной вибрации

Измерение вибрации – это один из самых популярных и экономичных методов диагностики общего состояния оборудования и имеет неоспоримое значение в современной технике. Благодаря этому процессу производители и потребители могут быть уверены в надежности и качестве технических систем, а также предотвращать возможные поломки и сбои. А широкий объем вибрационных измерений в различных областях подтверждает их универсальность и важность в современном техническом прогрессе. Цель измерения воздействия критических температур на датчик температуры заключается в определении того, как изменение критической температуры может повлиять на точность и надежность работы преобразователя. Это позволит улучшить качество измерения температуры, исключить погрешности и ошибки в работе оборудования, а также повысить эффективность его использования в различных условиях эксплуатации.

С. И. Фролов, Е. А. Данилова, И. И. Кочегаров
Компоновка безрезонансных блоков бортовых радиоэлектронных систем с использованием двухслойных печатных плат с жесткой основой

Целью работы является разработка инженерной методики расчета печатных узлов с жесткой подложкой. Проведен анализ методов и способов расчета безрезонансных (в рабочем диапазоне частот) электронных блоков бортовых радиоэлектронных средств (БРЭС) и в целом проектирования безрезонансных электронных блоков. Проведено моделирование собственных частот колебаний для различных способов закрепления печатных узлов.

А. Н. Якимов
Модельное исследование влияния формы переменного-фазных участков распределения поля на излучение антенны

В радиотехнических системах различного назначения при решении задач на максимальных дальностях в широком секторе углов используются микроволновые антенны с диаграммой направленности секторного вида. Для формирования такой диаграммы направленности в антенне

требуется создать переменнo-фазное распределение источников возбуждения (токов или полей). Модельное исследование влияния формы отдельных участков переменнo-фазным распределением поля в апертуре микроволновой антенны на параметры ее квазисекторной диаграммы направленности может быть проведено путем представления этого распределения комбинацией математических функций с использованием логики предикатов.

№ 4 (48)

*В. П. Перевертов, А. Г. Жданов, Н. А. Кузин,
В. Н. Новикова, Н. К. Юрков*

К проблеме повышения надежности устройств диагностики наноматериалов в гибридных технологиях

Термин «оптическая когерентная томография» появился много десятилетий назад в работах, посвященных расширению возможностей низкокогерентной рефлектометрии для визуализации внутренней структуры мутных сред. Этот термин, несмотря на то, что он не совсем соответствует общепринятой концепции томографии (послойное восстановление изображения путем решения обратной математической задачи), в настоящее время признан во всем мире. Целью исследования является анализ методов диагностики наноматериалов в гибридных технологиях формообразования деталей в транспортной инженерной системе (газотурбинные моторвагонные поезда, изготовленные из новых материалов).

*А. В. Зубарь, О. В. Духанов,
А. А. Громов, А. Ю. Тычков*

Способы автоматического определения границ адаптивных областей поиска соответствий на стереоизображениях

Анализ существующих способов проведения автоматического поиска соответствий на стереоизображениях показал, что в области автоматизации поиска соответствий на стереопарах с точки зрения одновременных минимизации вычислительных затрат и обеспечения точности вычислений присутствуют проблемные вопросы. Связаны они, в первую очередь, с автоматическим определением положения ограниченной с двух сторон и адаптивной по форме и характеру дисторсии области поиска в условиях обеспечения возможности ее перестройки в реальном масштабе времени при динамичном изменении взаимного положения в пространстве видеоканалов с известными и неизвестными внутренними параметрами, а также при обработке изображений высокого разрешения без их предварительной попиксельной переработки.

*Ю. В. Федюкин, Е. И. Минаков, И. Е. Агуреев,
Н. И. Хазов, В. М. Чайковский*

Построение и применение модели эффективности интеллектуальной транспортной системы

Тема оценки эффективности интеллектуальных транспортных систем на сегодня актуальна и важна. Она оказывает управляющие воздействия на транспортную систему города (агломерации) и обеспечивает достижение необходимого уровня индикаторов в части пропускной

Е. А. Пафилов, А. В. Петешов, А. С. Ишков
**Алгоритм оптимального обнаружения
 в поляриметрической радиолокационной
 системе**

способности, безопасности дорожного движения, уровня загруженности улично-дорожной сети и обслуживания дорожного движения.

В поляризационных радиолокационных системах с синтезированной апертурой в сравнении с обычными, использующими излучение и прием сигналов фиксированной поляризации, организуются дополнительный канал излучения и три дополнительных канала приема. Это существенно увеличивает количество информации о радиолокационных объектах и расширяет возможности по повышению качества обнаружения целей. Оптимальный поляриметрический обнаружитель вводится для идеальной ситуации, когда характеристики помехи полностью известны. Такой алгоритм обеспечивает потенциально достижимые характеристики обнаружения цели на фоне помехи. В общей постановке задача обнаружения цели на фоне помех формулируется как задача проверки статистических гипотез о наличии или отсутствии цели по наблюдаемой реализации сигнала.

*А. И. Власов, А. В. Гараев, В. О. Захарова,
 К. В. Селиванов, Д. Д. Чернышов*
**Методика профилизации беспилотных
 летательных аппаратов на основе
 аддитивных технологий**

Проводится анализ современных аддитивных технологий и их применение для производства беспилотных аппаратов. Проведены систематизация и обобщение методов и средств профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий. Систематизированы возможности аддитивных технологий и их преимущества по сравнению с традиционными технологиями производства деталей различных машин.

*А. А. Рыжов, А. В. Лысенко, И. М. Рыбаков,
 В. С. Мамонтов, Н. К. Юрков*
**К проблеме повышения надежности
 самовосстанавливающихся предохранителей**

Рассмотрена специфика изготовления самовосстанавливающихся предохранителей на основе полимерной сшивки.

*Е. А. Данилова, Н. С. Алмашкина,
 И. М. Рыбаков*
**Применение статистических методов оценки
 надежности печатных плат**

В современной радиоэлектронной аппаратуре печатные платы являются основной составляющей и выполняют важную роль объединения всех электронных элементов для выполнения заданных функций устройства. Процесс производства печатных плат довольно сложен и включает несколько стадий, каждая из которых состоит из определенного набора работ. Возникновение технологических дефектов возможно на любой стадии и связано с условиями производства, используемым оборудованием, применяемыми материалами, квалификацией персонала и т.д. Поэтому особо важным становится учет и анализ всех возникающих дефектов для своевременного изменения и корректировки технологического процесса производства печатных плат в целях недопущения выпуска некачественной продукции.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

№ 1 (45)

*Л. Ю. Кривоногов, М. С. Геращенко,
С. И. Геращенко, А. Н. Митрошин, С. Ф. Левин*
**Нейросетевой модуль контроля качества
зарегистрированных сигналов для систем
амбулаторного персонального
телемониторинга ЭКГ**

Рассматривается разработка системы амбулаторного персонального телемониторинга ЭКГ (АПТЭКГ). Показана связь повышения достоверности принимаемых решений в системах АПТЭКГ с контролем качества зарегистрированных электрокардиосигналов (ЭКС). Доказана целесообразность включения в состав систем АПТЭКГ модуля контроля качества зарегистрированных ЭКС.

№ 2 (46)

А. В. Заяра, М. Е. Данилин
**Применение нечеткого логического вывода
для моделирования процесса изменения
технического состояния электроаппаратуры
мобильных робототехнических комплексов**

Современные робототехнические комплексы оснащаются сложной электроаппаратурой, на долю которой приходится более половины отказов, обусловленных деградационными процессами. В целях предупреждения о приближении предельного состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов транспортного назначения необходимо проводить мониторинг.

№ 3 (47)

Г. С. Макеева
**Электронно-управляемые нелинейные
устройства дальнего и среднего
инфракрасного диапазона на платформе
графеновой плазмоники. Обзор**

Актуальность тематики обусловлена необходимостью освоения инфракрасного (ИК) диапазона для оптических телекоммуникационных систем, ИК-спектроскопии и приложений биофотоники и диктуется потребностями нелинейной ИК-оптики в реализации активных оптических функций на основе графена, таких как генерация ИК-излучения, преобразование частоты для применений в оптической связи, обработке материалов, точных измерениях, спектроскопическом зондировании и биологических сенсорах. Цель данной работы – представить принципы построения и функционирования электрически перестраиваемых нелинейных устройств дальнего и среднего ИК-диапазона: генераторов гармоник и умножителей, преобразователей частоты и смесителей на основе графеновых ей, основываясь на новейших достижениях графеновой плазмоники.

А. И. Годунов, С. А. Куканов, П. С. Суздальцев
**Навигационные элементы полета
беспилотного летательного аппарата**

Рассматривается проблема навигации и управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА). Для обеспечения эффективного выполнения полетного задания предлагается учитывать в расчетах навигационные элементы полета беспилотного летательного аппарата. Особенностью предложенного метода является возможность оценки характеристик и параметров

А. В. Васильева

Исследование алгоритмов измерения составляющих вектора скорости радиовысотомерных систем, адаптивных к подстилающей поверхности

элементов, влияющих на траекторию и точность полета. Учитываются различные факторы, такие как аэродинамические свойства БЛА, условия окружающей среды, системы навигации и управления.

Современный этап развития авиации характеризуется устойчивой тенденцией к повышению требований к тактико-техническим характеристикам летательных аппаратов, в том числе к системам маршрутной навигации. Естественное следствие такой тенденции – повышение роли и значения радиолокационных датчиков навигационной информации. К таковым относятся радиовысотомерные системы (РВС), обеспечивающие измерение высоты и составляющих вектора скорости в связанной системе координат. В настоящее время актуальной задачей является повышение точности измерения параметров движения летательных аппаратов над неоднородными сложными поверхностями.

*Ю. Т. Зырянов, Д. Ш. Калхиташили,
С. П. Хрипунов*

Разработка прототипа архитектуры интеллектуального микроконтроллера при реализации приложений Интернета вещей

В рамках современной парадигмы цифровой трансформации общества и бурного роста количества цифровых технологий внедрение Интернета вещей (IoT) происходит во все сферы жизни человека. Данные технологии применяются в промышленном секторе экономики и в частной жизни. Разработка и внедрение Интернета вещей – это парадигма, заключающаяся в разработке связанных между собой технических объектов при помощи различных методов и протоколов связи, с передачей данных в облачный центр. Данная технология имеет ряд ограничений: в виде объема памяти, электрического заряда и низкой эффективности процессора. Второе ограничение – отсутствие алгоритмов машинного обучения. В связи с этим требуются новые методы и инженерные подходы для решения данной проблемы. Цель статьи – разработка архитектуры прототипа микроконтроллера для контроля технического состояния информационно-измерительных и управляющих систем на основе концепции Интернета вещей и алгоритмов машинного обучения для обработки многопоточных источников данных.

*Д. В. Егжов, Л. А. Надейкина,
П. О. Терешко*

Система поддержки авиапассажиров с использованием технологий мониторинга их местоположения

Представлена система мониторинга местоположения авиапассажиров в здании аэропорта, предоставляющая сервис оповещения опаздывающих на посадку, а также предоставляющая эффективный способ скорейшего следования к месту посадки.

Н. О. Борщев

Метод идентификации теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов, предназначенных для термостатирования аппаратуры в условиях невесомости

Рассматривается последовательный алгоритм идентификации теплофизических характеристик, таких как коэффициент теплопроводности материала, массовая теплоемкость и интегрально-излучательная способность поверхности криогенной теплоизоляции для орбитального участка полета.

А. В. Заяра, В. П. Фандеев

Моделирование кратных отказов в аппаратуре мобильных робототехнических комплексов

Робототехнические комплексы оснащаются сложной электроаппаратурой различных принципов действия, которая подвержена неизбежным отказам. Успешный поиск мест отказов, в том числе и кратных, будет определять эффективность системы технического обслуживания и ремонта.

*М. И. Корнилова, С. В. Бусыгин,
В. Н. Ковальногов, В. Н. Клячкин*

Прогнозирование качества функционирования технического объекта с использованием машинного обучения

Качество функционирования сложных технических систем определяется множеством характеристик. Прогнозирование значений этих характеристик по результатам мониторинга показателей работы объекта дает возможность выполнить постоянно растущие требования по обеспечению безопасности и надежности. Необходимая точность прогнозирования требует построения качественных математических моделей. В качестве технического объекта рассмотрено горелочное устройство: оценивается качество функционирования таких устройств по одной из основных характеристик – температуре ядра пламени. Цель исследования – разработка методики построения математической модели, которая бы обеспечила достаточно точный прогноз характеристик функционирования технического объекта.

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

А. В. Маслобоев

Индикаторный метод интегральной оценки жизнеспособности региональных критических инфраструктур на основе нечетких вычислений (Часть 1. Постановка задачи и общая структура метода)

Исследование направлено на развитие известных и разработку новых моделей и методов поддержки принятия решений в области управления безопасностью и устойчивым функционированием критических инфраструктур и социально-экономических объектов Арктической зоны Российской Федерации. Эта задача особенно актуальна на региональном уровне с точки зрения необходимости повышения защищенности критически важных объектов/инфраструктур, сдерживания каскадных эффектов воздействия множественных угроз различной природы на системы более высокого уровня и обеспечения благоприятных условий для смягчения негативных последствий влияющих факторов на состояние работоспособности элементов этих систем.

О. В. Кузнецова, В. А. Шорин, В. Б. Алмаметов
**Информационно-логические модели
динамики гетероструктур безопасности**

Рассматривается проблема обеспечения безопасности личности, общества и цивилизации.

№ 2 (46)

В. П. Перевертов, Н. А. Кузин
**К вопросу безопасности движения
транспортно-технологических систем
и надежности технических средств**

Обоснована необходимость надежности крепления колесной техники на открытой железнодорожной платформе при возрастающих нагрузках и скоростях движения подвижного состава.

А. В. Маслобоев
**Обобщенная методология построения
мультиагентных систем управления
жизнеспособностью критических
инфраструктур**

Работа направлена на адаптацию, применение и развитие технологий распределенного искусственного интеллекта для задач информационно-аналитического обеспечения ситуационных центров регионального уровня и повышения эффективности их функционирования при управлении безопасностью и жизнеспособностью критических инфраструктур. Цифровизация ситуационного управления требует разработки и внедрения адаптивных самоорганизующихся систем, основанных на знаниях и обладающих высокой автономностью, про-активностью и интероперабельностью.

А. В. Маслобоев
**Индикаторный метод интегральной оценки
жизнеспособности региональных
критических инфраструктур на основе
нечетких вычислений (Часть 2. Модели
показателей качества жизнеспособности)**

Исследование направлено на развитие известных и разработку новых моделей и методов поддержки принятия решений в области управления безопасностью и устойчивым функционированием критических инфраструктур и социально-экономических объектов Арктической зоны Российской Федерации. Эта задача особенно актуальна на региональном уровне с точки зрения необходимости повышения защищенности критически важных объектов/инфраструктур, сдерживания каскадных эффектов воздействия множественных угроз различной природы на системы более высокого уровня и обеспечения благоприятных условий для смягчения негативных последствий влияющих факторов на состояние работоспособности элементов этих систем.

№ 4 (48)

*А. К. Бейсенбаева, Д. С. Ергалиев,
М. А. Богачева, Е. С. Сулейманова,
А. М. Мухамбетов*
**Прогнозирование качества
функционирования технического объекта
с использованием машинного обучения**

Современное состояние казахстанских аэропортов показывает их обеспеченность сложным техническим оборудованием, позволяющим отслеживать, идентифицировать, распознавать лица, выявлять запрещенные к перевозке предметы. Все эти процедуры позволяют осуществлять качественный контроль пассажиров. Однако развивающиеся угрозы авиационной безопасности требуют инновационных подходов и мгновенных решений.

A. V. Masloboev

Application of the Ignatyev adaptative maximum principle in management of critical infrastructures resilience

The research work is aimed at adapting and applying state-of-the-art cybernetic methods for analyzing complex dynamic systems in order to improve the management efficiency of regional critical infrastructures resilience and safety, and enhancing the analytical capabilities of decision support systems used in this area. The urgency of this problem is due to the lack of a unified methodological framework and best practices for maintaining the stable resilient operating of critical infrastructures of various levels and types under conditions of uncertainty and risk.

Е. А. Воронин, А. Г. Семкин

Управление продовольственной безопасностью методами машинного обучения в информационном пространстве аграрно-промышленного комплекса

Рассматривается уточненная постановка задачи управления продовольственной безопасностью при формировании цифровой экономики, разработанная на основе вероятностной оценки реализации организационных, организационно-ресурсных и технико-технологических процессов обеспечения продовольственной безопасности с применением универсальной методики.