

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Дивеев А. И., Софронова Е. А.
РЕШЕНИЕ УТОЧНЕННОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ 5

Шмалько Е. Ю.
МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ
НА БАЗЕ ПРИНЦИПА СИНТЕЗИРОВАННОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ.....18

Роганов В. Р., Швыров В. В.
СТАТИСТИЧЕСКИЕ И СЕМАНТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА
ТЕНДЕНЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ, ТРАНСПОРТИРОВКЕ
И ИСПОЛЗОВАНИИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА.....30

Пешков И. В., Жигулин В. А., Фортунова Н. А.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ ЦИФРОВЫМИ АНТЕННЫМИ
РЕШЕТКАМИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....40

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Перевертов В. П., Жданов А. Г., Кузин Н. А., Новикова В. Н., Юрков Н. К.
К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ ДИАГНОСТИКИ
НАНОМАТЕРИАЛОВ В ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ.....53

Зубарь А. В., Духанов О. В., Громов А. А., Тычков А. Ю.
СПОСОБЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ АДАПТИВНЫХ
ОБЛАСТЕЙ ПОИСКА СООТВЕТСТВИЙ НА СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ.....62

Федюкин Ю. В., Минаков Е. И., Агуреев И. Е., Хазов Н. И., Чайковский В. М.
ПОСТРОЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ.....77

Пафиков Е. А., Петешов А. В., Ишков А. С.
АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ В ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЙ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ88

Власов А. И., Гараев А. В., Захарова В. О., Селиванов К. В., Чернышов Д. Д.
МЕТОДИКА ПРОФИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ95

Рыжов А. А., Лысенко А. В., Рыбаков И. М., Мамонтов В. С., Юрков Н. К.
К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ
САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ..... 111

Данилова Е. А., Алмашкина Н. С., Рыбаков И. М. ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	119
---	-----

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Борщев Н. О. МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ	130
--	-----

Заяра А. В., Фандеев В. П. МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАТНЫХ ОТКАЗОВ В АППАРАТУРЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	142
---	-----

Корнилова М. И., Бусыгин С. В., Ковальногов В. Н., Клячкин В. Н. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	152
---	-----

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Бейсенбаева А. К., Ергалиев Д. С., Богачева М. А., Сулейманова Е. С., Мухамбетов А. М. ПРОФАЙЛИНГ КАК ТЕХНОЛОГИЯ В СИСТЕМЕ АВИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭРОПОРТА	159
--	-----

Masloboev A. V. APPLICATION OF THE IGNATYEV ADAPTATIVE MAXIMUM PRINCIPLE IN MANAGEMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURES RESILIENCE.....	165
---	-----

Воронин Е. А., Семкин А. Г. УПРАВЛЕНИЕ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ АГРАРНО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА	179
--	-----

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

- Diveev A.I., Sofronova E.A.**
SOLUTION OF THE REFINED OPTIMAL CONTROL PROBLEM
USING A UNIVERSAL STABILISATION SYSTEM 5
- Shmalko E.Yu.**
MACHINE LEARNING OF CONTROL SYSTEMS WITH FEEDBACK
BASED ON THE PRINCIPLE OF SYNTHESIZED OPTIMAL CONTROL 18
- Roganov V.R., Shvyrov V.V.**
STATISTICAL AND SEMANTIC METHODS OF ANALYZING TRENDS
IN PRODUCTION, TRANSPORTATION AND THE USE OF COAL-WATER FUEL 30
- Peshkov I.V., Zhigulin V.A., Fortunova N.A.**
MODELING OF THE RADIO DIRECTION FINDING PROCESS BY DIGITAL ANTENNA ARRAYS
TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF MUTUAL COUPLING OF ANTENNA ELEMENTS 40

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

- Perevertov V.P., Zhdanov A.G., Kuzin N.A., Novikova V.N., Yurkov N.K.**
ON THE PROBLEM OF INCREASING THE RELIABILITY
OF NANOMATERIAL DIAGNOSTIC DEVICES IN HYBRID TECHNOLOGIES 53
- Zubar A.V., Dukhanov O.V., Gromov A.A., Tychkov A.Yu.**
WAYS TO AUTOMATICALLY DETERMINE THE BOUNDARIES
OF ADAPTIVE MATCHING AREAS ON STEREO IMAGES 62
- Fedyukin Yu.V., Minakov E.I., Agureev I.E., Khazov N.I., Chaykovskiy V.M.**
ON THE ISSUE OF DEVELOPING A MODEL OF A TRANSPORT SYSTEM
OF INDIVIDUAL MOVEMENTS WITH MANAGEMENT 77
- Pafikov E.A., Peteshov A.V., Ishkov A.S.**
OPTIMAL DETECTION ALGORITHM IN A POLARIMETRIC RADAR SYSTEM 88
- Vlasov A.I., Garaev A.V., Zakharova V.O., Selivanov K.V., Chernyshov D.D.**
ADDITIVE TECHNOLOGIES AND PROFILING OF GENERAL
PURPOSE DRONES: THE FUTURE OF AVIATION 95
- Ryzhov A.A., Lysenko A.V., Rybakov I.M., Mamontov V.S., Yurkov N.K.**
TO THE PROBLEM OF INCREASING THE RELIABILITY OF SELF-REPAIRING FUSES 111
- Danilova E.A., Almashkina N.S., Rybakov I.M.**
APPLICATION OF STATISTICAL METHODS EVALUATION
OF THE RELIABILITY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS 119

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Borshchev N.O.

METHOD OF IDENTIFICATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS
OF THERMAL INSULATION MATERIALS INTENDED FOR TEMPERATURE
CONTROL OF EQUIPMENT IN ZERO GRAVITY CONDITIONS..... 130

Zayara A.V., Fandeev V.P.

SIMULATION OF MULTIPLE FAILURES IN THE EQUIPMENT
OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES 142

Kornilova M.I., Busygin S.V., Kovalnogov V.N., Klyachkin V.N.

FORECASTING THE QUALITY OF THE TECHNICAL OBJECT'S
FUNCTIONING USING MACHINE LEARNING 152

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Beysenbaeva A.K., Ergaliev D.S., Bogacheva M.A., Suleymanova E.S., Mukhambetov A.M.

PROFILING AS A TECHNOLOGY IN THE AIRPORT AVIATION SECURITY SYSTEM 159

Masloboev A.V.

APPLICATION OF THE IGNATYEV ADAPTATIVE MAXIMUM PRINCIPLE
IN MANAGEMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURES RESILIENCE..... 165

Voronin E.A., Semkin A.G.

FOOD SECURITY MANAGEMENT BY MACHINE LEARNING METHODS
IN THE INFORMATION SPACE OF THE AGRICULTURAL AND INDUSTRIAL COMPLEX..... 179

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 51-74

doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-1

РЕШЕНИЕ УТОЧНЕННОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ

А. И. Дивеев¹, Е. А. Софронова²

^{1,2} Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»

Российской академии наук, Москва, Россия

¹ aidiveev@mail.ru, ² sofronova_ea@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* 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. *Материалы и методы.* Для решения задачи синтеза системы стабилизации используется метод символьной регрессии, метод сетевого оператора. Реальный объект управления включает эталонную модель объекта управления для генерации программной траектории. Приведен пример решения уточненной задачи оптимального управления пространственным движением квадрокоптера с фазовыми ограничениями. На первом этапе была решена задача оптимального управления в классической постановке и была найдена функция управления в форме кусочно-линейной аппроксимации как функция времени. Задача решалась на основе прямого подхода, в котором точность попадания в терминальное состояние и штрафы за нарушение фазовых ограничений были включены в один функционал совместно с заданным критерием качества. Для решения использовался эволюционный алгоритм, который нашел шестьдесят восемь параметров. Для подтверждения плохой реализуемости найденного решения было проведено моделирование полученного решения с малым возмущением начальных условий. В результате решение не достигло терминального состояния и фазовые ограничения были существенно нарушены. На втором этапе была решена уточненная задача оптимального управления, в которой для полученной программной траектории была решена задача синтеза стабилизации движения по этой траектории. При решении задачи синтеза начальное состояние было изменено на множество начальных состояний, и целевая функция представляла собой сумму значений заданного критерия для всех начальных состояний. Для проверки реализуемости полученного решения проведено моделирование системы управления с возмущенными начальными значениями. *Результаты и выводы.* Результаты моделирования показали, что все возмущенные траектории достигли терминального состояния практически без нарушений фазовых ограничений. В работе предполагается, что полученная система стабилизации работает для траекторий из определенного класса. Для подтверждения этого предположения была решена другая задача оптимального управления с теми же фазовыми ограничениями, но с другой траекторией их обхода. Для полученного оптимального управления была использована та же система стабилизации. Моделирование возмущенного решения подтвердило выдвинутое предположение.

Ключевые слова: оптимальное управление, синтез управления, система стабилизации, эволюционный алгоритм, символьная регрессия

Финансирование: работа выполнена при частичной поддержке РФФ, проект № 23-29-00339.

Для цитирования: Дивеев А. И., Софронова Е. А. Решение уточненной задачи оптимального управления с помощью универсальной системы стабилизации // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 5–17. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-1

SOLUTION OF THE REFINED OPTIMAL CONTROL PROBLEM USING A UNIVERSAL STABILISATION SYSTEM

A.I. Diveev¹, E.A. Sofronova²

^{1,2} Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
¹ aidiveev@mail.ru, ² sofronova_ea@mail.ru

Abstract. *Background.* The paper contains a refined statement of the optimal control problem, the solution of which, in contrast to the classical formulation, can be implemented directly in a real object. For this purpose, the optimal control problem includes the problem of synthesis of the stabilisation system of the object motion along the optimal trajectory, which is obtained as a result of solving the classical optimal control problem. *Materials and methods.* To solve the problem of stabilisation system synthesis the method of symbolic regression, method of network operator, was applied. The real control object contains a reference model of the control object for generating the program trajectory. An example of the solution of the refined optimal control problem of the spatial motion of a quadcopter with phase constraints is presented. In the first step, the optimal control problem was solved in the classical formulation and the control function was found in the form of a piecewise linear approximation as a time function. The problem was solved using a direct approach in which the accuracy of reaching the final state and the penalties for violating the phase constraints were included in a single function together with a given quality criterion. An evolutionary algorithm was used for the solution, which found sixty-eight parameters. To confirm the poor feasibility of the solution found, a simulation of the solution obtained with a small perturbation of the initial conditions was carried out. As a result, the solution did not reach the final state and the phase constraints were significantly violated. In the second stage, a refined optimal control problem was solved, in which the synthesis problem of motion stabilisation along this trajectory was solved for the obtained program trajectory. When solving the synthesis problem, the initial state was changed to a set of initial states, and the target function was the sum of values of a given criterion for all initial states. To verify the feasibility of the obtained solution, a simulation of the control system with perturbed initial values was carried out. *Results and conclusions.* The simulation results showed that all perturbed trajectories reached the final state practically without violating the phase constraints. In this paper, it is assumed that the obtained stabilisation system works for trajectories of a certain class. To confirm this assumption, another optimal control problem was solved with the same phase constraints but with a different trajectory of their circumvention. The same stabilisation system was used for the obtained optimal control. Modelling of the perturbed solution confirmed the assumption.

Keywords: optimal control, control synthesis, stabilisation system, evolutionary algorithm, symbolic regression

Financing: the work was partially supported by the RGNF, project No. 23-29-00339.

For citation: Diveev A.I., Sofronova E.A. Solution of the refined optimal control problem using a universal stabilisation system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):5–17. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-1

Введение

Настоящая работа является развитием исследований, приведенных в работах [1, 2]. В работе [1] сформулирована уточненная постановка задачи оптимального управления. Классическая постановка Понтрягина [3] дополняется требованием, чтобы результирующая оптимальная траектория имела непустую окрестность со свойствами аттрактора. Для этого сначала ищется управление как функция времени и состояния, а для реализации системы стабилизации начальное состояние заменяется областью начальных состояний. Обеспечение дополнительных требований может быть получено различными способами, например, путем переформулирования задачи оптимального управления в задачу синтеза общего управления для заданной области начальных состояний, тогда каждое конкретное решение из данной области обеспечивает оптимальное значение заданного критерия качества. Другой подход заключается в решении задачи синтеза управления с целью обеспечения устойчивости относительно терминального состояния, но в этом случае не гарантируется получение оптимального значения заданного критерия качества.

Для стабилизации движения объекта управления по оптимальной траектории в теоретических работах [4] предлагается линеаризовать модель относительно траектории и получить линейную нестационарную модель объекта. Для обеспечения устойчивости такого объекта предлагается использовать линейную обратную связь. В целом устойчивость нестационарного объекта не является нерешенной проблемой. В большинстве практических работ на отслеживаемой траектории задаются точки, относительно которых объект управления становится устойчивым. Для этого используются

ПИ- и ПИД-регуляторы [5–8]. Движение по точкам устойчивой траектории замедляет движение объекта вблизи точки устойчивости, поэтому оптимальное значение критерия не сохраняется. В работе [9] построена система слежения за траекторией квадрокоптера, основанная на стабилизации скорости квадрокоптера в горизонтальной плоскости вдоль прямой линии. Для этого строится П-регулятор на основе функции Ляпунова. Движение по траектории прямолинейных участков с постоянной скоростью не является оптимальным. Необходимо отслеживать траекторию не только в пространстве, но и во времени. В работе [10] рассматривается подход к решению задачи оптимального управления методом синтезированного управления. Синтезированное управление является универсальным подходом к решению задачи оптимального управления в классе реализуемых систем, однако в каждом конкретном случае оно может иметь несколько решений.

Впервые задача синтеза стабилизации движения по оптимальной траектории была рассмотрена в работе [11]. Была получена система управления, включающая эталонную модель для генерации оптимальной траектории во времени. Исследования показали, что система стабилизации зависит от вида оптимальной траектории. Для устранения данного недостатка в работе [2] было предложено использовать универсальную систему стабилизации. Универсальность системы стабилизации заключается в том, что для конкретного объекта получается одна система стабилизации движения для различных типов траекторий. Для этого сначала решается задача синтеза одной системы стабилизации для нескольких заданных траекторий. Класс траекторий рассматривается как обучающее множество, а синтез системы стабилизации – это обучение системы управления для заданного обучающего множества. Далее эта система стабилизации применяется к движению по траектории, не вошедшей в обучающий набор. Для решения задачи синтеза системы стабилизации применяются методы символьной регрессии [12, 13].

Постановка задачи

Математическая модель объекта управления задается в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

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

где \mathbf{x} – вектор состояния объекта управления, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_n]^T$, \mathbf{u} – вектор управления, $\mathbf{u} \in \mathbf{U} \subseteq \mathbf{R}^m$, множество \mathbf{U} – компактное множество, которое часто определяется ограничениями на управление

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

$$\mathbf{u}^- = [u_1^- \dots u_m^-]^T, \quad \mathbf{u} = [u_1 \dots u_m]^T, \quad \mathbf{u}^+ = [u_1^+ \dots u_m^+]^T.$$

Для системы (1) задано начальное состояние

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0. \quad (3)$$

Терминальное состояние задается как

$$\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}^f, \quad (4)$$

где t_f – время достижения терминального состояния, как правило не задано, но ограничено, $t_f \leq t^+$, t^+ – максимально возможное по мнению исследователя предельное время длительности процесса управления.

Критерий качества задается в общем интегральном виде

$$J_0 = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) dt \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}}. \quad (5)$$

При решении задачи прямым численным методом терминальное состояние (4) достигается с определенной точностью, которая входит в критерий качества (5). Таким образом, критерий качества численного решения задачи имеет следующий вид

$$J_1 = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) dt + p_1 \|\mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_f)\| \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in U}, \quad (6)$$

где p_1 – весовой коэффициент, определяющий сравнительную важность точности достижения терминального состояния по сравнению со значением подынтегрального критерия качества

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \|\mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t)\| \leq \varepsilon_1, \\ t^+ & \text{иначе,} \end{cases} \quad (7)$$

где ε_1 – заданная точность достижения терминального состояния (4).

В классической задаче оптимального управления ищем функцию управления как функцию времени

$$\mathbf{u} = \mathbf{v}(t) \in U. \quad (8)$$

Для обеспечения стабилизации движения объекта вдоль найденной программной траектории решаем задачу синтеза системы стабилизации движения объекта по программной траектории. В задаче синтеза вместо одного начального состояния (3) задаем область начальных состояний. Для численного решения область начальных состояний задаем в виде конечного множества точек

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

Задаем одно терминальное состояние (4).

Оптимальная траектория является функцией времени

$$\mathbf{x}^*(t), \quad t \in (0; t_f). \quad (10)$$

Необходимо найти оптимальное управление как функцию отклонения вектора пространства состояний от оптимальной траектории в каждый момент времени

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}). \quad (11)$$

Если функцию управления (11) вставить в правую часть системы дифференциальных уравнений модели (1), то получим следующую систему:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})). \quad (12)$$

Функция управления (11) должна минимизировать сумму максимальных отклонений всех частных решений системы (12) из начальных состояний заданной области (9) и учитывать точность попадания в терминальное состояние

$$J_2 = \sum_{i=1}^K \left(\max_{t \in (0; t_{f,i})} \|\mathbf{x}^* - \mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i})\| + p_1 \|\mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_{f,i})\| \right) \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in U}, \quad (13)$$

где $t_{f,i}$ – время достижения заданного терминального состояния частного решения из начального состояния $\mathbf{x}^{0,i}$, определяемого уравнением (7), $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i})$ – частное решение системы (12) из начального состояния $\mathbf{x}^{0,i}$.

Для генерации программной траектории добавим к модели замкнутой системы управления (12) эталонную модель, то получим модель объекта управления размерности $2n$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})), \quad (14)$$

$$\dot{\mathbf{x}}^* = \mathbf{f}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}),$$

где функция системы стабилизации $\mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})$ удовлетворяет ограничениям на управление при любых значениях своих аргументов

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) \in U. \quad (15)$$

Теперь, если решаем новую задачу оптимального управления для модели объекта (14), несмотря на то, что ищем функцию управления как функцию времени (8), получаем функцию управления, реализуемую непосредственно в объекте управления. Это определено тем, что функцию управления ищем как программу управления для эталонной модели, которая генерирует программную траекторию, а объект управления движется по полученной программной траектории под действием функции управления обратной связи (11).

Проблема реализуемости функции управления, точнее модели объекта управления с включенной в нее функцией управления, связана с тем, что любая модель описывает объект управления не точно. В большинстве случаев со временем ошибка между состоянием объекта, вычисленным по модели, и его реальным состоянием возрастает. В результате она достигает критической величины, при которой управление объектом становится невозможным. Поэтому на практике реализуемая функция управления суть функция обратной связи, которая учитывает отклонения реального состояния объекта управления от вычисленного по модели. Для получения функции управления обратной связи необходимо решить задачу синтеза управления, т.е. найти векторную функцию управления, аргументом которой является вектор состояния объекта управления. Но проблема состоит в том, что задача синтеза управления существенно сложнее задачи оптимального управления. Если современные вычислительные средства позволяют решить задачу оптимального управления на бортовом процессоре, практически в реальном времени и найти функцию управления как функцию времени, например с помощью кусочно-линейной аппроксимации, то решить задачу синтеза управления возможно только на этапе проектирования системы управления в лабораторных условиях.

В данном случае на этапе проектирования решена одна задача оптимального управления и получена функция управления как функция времени, и программная траектория тоже как функция времени. Далее на этапе проектирования решена задача синтеза управления и получена функция управления обратной связи, которая обеспечивает движение объекта управления вдоль найденной на предварительном этапе программной траектории. Очевидно, что функция управления обратной связи реализуема на практике. На основе синтезированной функции управления обратной связи строим расширенную* модель объекта управления, которая включает в правые части функцию управления, обеспечивающую стабилизацию движения объекта управления вдоль программной траектории, генерируемой эталонной моделью, включенной в расширенную модель объекта управления (14). Теперь решаем на бортовом процессоре различные задачи оптимального управления, получаем программные траектории и реализуем движение объекта управления по полученным программным траекториям за счет синтезированной на этапе проектирования системы стабилизации.

Приведем формулировку задачи оптимального управления для расширенной модели (14) объекта управления.

Задано начальное состояние (3). Задано терминальное состояние (4). Задан критерий качества

$$J_3 = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})) dt + p_1 \|\mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_f)\| \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in U} . \quad (16)$$

Необходимо найти функцию управления в виде функции времени (8).

В задаче ищем функцию управления как функцию времени, а получаем замкнутую систему управления с обратной связью, так как функцию управления ищем для эталонной модели для получения программной траектории, а универсальная система стабилизации обеспечивает движение объекта вдоль программной траектории при возможных реальных возмущениях.

Вычислительный эксперимент

Рассмотрим задачу оптимального управления пространственным движением квадрокоптера. Математическая модель объекта управления имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_4, \\ \dot{x}_2 &= x_5, \\ \dot{x}_3 &= x_6, \\ \dot{x}_4 &= u_4(\sin(u_3)\cos(u_2)\cos(u_1) + \sin(u_1)\sin(u_2)), \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_5 &= u_4 \cos(u_3) \cos(u_1) - g, \\ \dot{x}_6 &= u_4 (\cos(u_2) \sin(u_1) - \cos(u_1) \sin(u_2) \sin(u_3)),\end{aligned}$$

где $g = 9,80665$.

Пространственное перемещение квадрокоптера выполняется за счет изменения углов наклона квадрокоптера u_1, u_2, u_3 , которые обеспечивают необходимую проекцию силы тяги u_4 винтов квадрокоптера на горизонтальную плоскость $\{x_1; x_3\}$. Для значений компонент вектора управления заданы ограничения

$$\begin{aligned}-\pi/12 &= u_1^- \leq u_1 \leq u_1^+ = \pi/12, \\ -\pi &= u_2^- \leq u_2 \leq u_2^+ = \pi, \\ -\pi/12 &= u_3^- \leq u_3 \leq u_3^+ = \pi/12, \\ 0 &= u_4^- \leq u_4 \leq u_4^+ = 12.\end{aligned}\tag{18}$$

Для модели (17) заданы начальное и терминальное состояния

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0 = [0 \ 5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,\tag{19}$$

$$\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}^f = [10 \ 5 \ 10 \ 0 \ 0 \ 0]^T.\tag{20}$$

Необходимо найти функцию управления как функцию времени (8), которая удовлетворяет ограничениям (18) и при ее подстановке в правые части системы (17) получаем такую систему обыкновенных дифференциальных уравнений, частное решение которой из начального состояния (19) достигает терминального состояния (20) с оптимальным значением заданного критерия качества

$$J_4 = t_f + p_1 \|\mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_f, \mathbf{x}^0)\| + p_2 \int_0^{t_f} \sum_{i=1}^M \vartheta(\varphi_i(\mathbf{x})) dt + p_3 \sum_{j=1}^N \min_{t \in \{0; t_f\}} \eta_j(\mathbf{x}(t)),\tag{21}$$

где $p_1 = 1, p_2 = 5, p_3 = 3, t_f$ определяем из соотношения (7) при $t^+ = 6,4, \varepsilon_1 = 0,1$,

$$\vartheta(\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha > 0, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\varphi_i(\mathbf{x}) = r_i - \sqrt{(a_{x,i} - x_1)^2 + (a_{z,i} - x_3)^2}, \quad i = 1, \dots, M = 3,$$

$$r_1 = 1, r_2 = 1, r_3 = 1, a_{x,1} = 2, a_{z,1} = 2, a_{x,2} = 5, a_{z,2} = 5, a_{x,3} = 8, a_{z,3} = 8,$$

$$\eta_j(\mathbf{x}(t)) = L_j(\mathbf{x}(t)) \vartheta(\delta_j - L_j(\mathbf{x}(t))),$$

$$L_j(\mathbf{x}(t)) = \sqrt{\sum_{k=1}^3 (g_{j,k} - x_k(t))^2}, \quad j = 1, \dots, N = 3,$$

$$g_{1,1} = 1, g_{1,2} = 5, g_{1,3} = 3, g_{2,1} = 6, g_{2,2} = 5, g_{2,3} = 4, g_{3,1} = 7, g_{3,2} = 5, g_{3,3} = 9, \delta_1 = 0,4, \delta_2 = 0,4, \delta_3 = 0,4.$$

В формуле (21) функции $\varphi_i(\mathbf{x}), i = 1, \dots, M = 3$, определяют условия выполнения фазовых ограничений. В данном случае это круговые области на плоскости $\{x_1; x_3\}$, куда объект не должен попадать. Функции $\eta_j(\mathbf{x}(t)), j = 1, \dots, N = 3$ – это области в трехмерном пространстве $\{x_1; x_2; x_3\}$ (шары), через которые объект обязательно должен пролететь. Соответственно, p_2, p_3 – коэффициенты штрафов за нарушение фазовых ограничений и пропуск обязательной для пролета области.

Для данной задачи находим функцию управления как функцию времени (8) прямым методом на основе кусочно-линейной аппроксимации. Для этой цели введем в рассмотрение интервал времени Δt и разобьем весь интервал управления $(0; t^+)$ на L интервалов

$$L = \left\lfloor \frac{t^+}{\Delta t} \right\rfloor. \quad (22)$$

Для каждого интервала компоненту вектора управления определяем в виде линейного отрезка, соединяющего два вещественных значения, заданных на границах интервала. Всего имеем $L+1$ границ интервалов. Для m компонент вектора управления необходимо найти $m(L+1)$ значений компонент вектора постоянных параметров

$$\mathbf{q} = [q_1 \ \dots \ q_{m(L+1)}]^T. \quad (23)$$

С учетом ограничений на управление (18) кусочно-линейная функция управления (8) для решения задачи оптимального управления (17) – (21) имеет следующий вид:

$$v_i(t) = \begin{cases} u_i^+, & \text{если } u_i^+ \leq \tilde{u}_i(t), \\ u_i^-, & \text{если } \tilde{u}_i(t) \leq u_i^-, \quad i = 1, \dots, m, \\ \tilde{u}_i(t) & - \text{иначе,} \end{cases} \quad (24)$$

где

$$\tilde{u}_i(t) = \frac{q_{i+jm} - q_{i+(j-1)m}}{\Delta t} (t - (j-1)\Delta t) + q_{i+(j-1)m}, \quad (25)$$

$$(j-1)\Delta t \leq t < j\Delta t, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, L.$$

Для рассматриваемой задачи устанавливаем $\Delta t = 0,4$, поэтому $L = 16$. Всего необходимо найти $m(L+1) = 4 \cdot (16+1) = 68$ параметров. Для решения задачи используем эволюционный гибридный алгоритм, который для одной и той же популяции возможных решений включает три типа эволюционных преобразований согласно генетическому алгоритму, алгоритму «роя-частиц» и алгоритму «оптимизатора серого волка».

В результате гибридный эволюционный алгоритм нашел следующее решение: $\mathbf{q}^{opt} = [-16.08389 \ -15.28755 \ -16.31609 \ 14.95188 \ -10.62907 \ -4.78333 \ 0.57000 \ 15.09140 \ -14.91674 \ 4.96100 \ 7.74769 \ 19.94703 \ -12.00959 \ 3.46782 \ -15.17209 \ -3.31380 \ 17.61858 \ -7.88980 \ -17.34375 \ 19.90094 \ 0.62639 \ 16.03902 \ -15.35935 \ 18.94003 \ 1.44680 \ 17.41909 \ 1.69807 \ 8.99746 \ -15.90066 \ 8.78135 \ -2.37638 \ 19.74956 \ 4.15111 \ -0.07598 \ 19.98296 \ 10.58280 \ -19.26423 \ -10.64365 \ -0.02360 \ 7.04801 \ -14.00564 \ -11.90236 \ 19.02182 \ 14.05206 \ 5.89434 \ -10.03158 \ -8.14191 \ 19.54826 \ 16.95683 \ -18.92949 \ -1.24965 \ 3.90631 \ 13.95724 \ -3.53541 \ -0.54602 \ 19.00056 \ -13.42070 \ 0.21022 \ -1.96763 \ 6.18557 \ -6.66326 \ 0.42091 \ -9.61879 \ 16.70781 \ -4.64609 \ 3.20324 \ 12.53990 \ 6.12437]^T$.

Проекция оптимальной траектории на горизонтальную плоскость представлена на рис. 1.

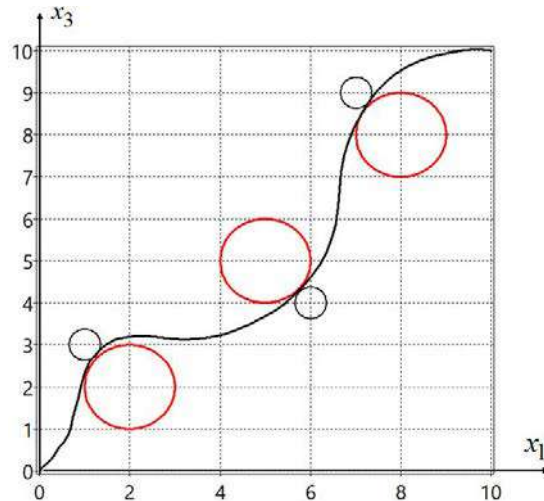


Рис. 1. Проекция оптимальной траектории на горизонтальную плоскость

На рис. 1 красными сферами указаны фазовые ограничения, малые черные сферы указывают области обязательного пролета квадрокоптером. Как видно из рисунка, квадрокоптер достиг терминального состояния, выполнил условия фазовых ограничений и пролетел через все обязательные области.

Данное управление не реализуемо на практике, так как является разомкнутым и не зависит от состояния объекта. Для примера на рис. 2 приведена проекция на горизонтальную плоскость траектории движения квадрокоптера с той же функцией управления, но с возмущенным начальным состоянием. Возмущения были выбраны случайно и не превышали величину 0,1.

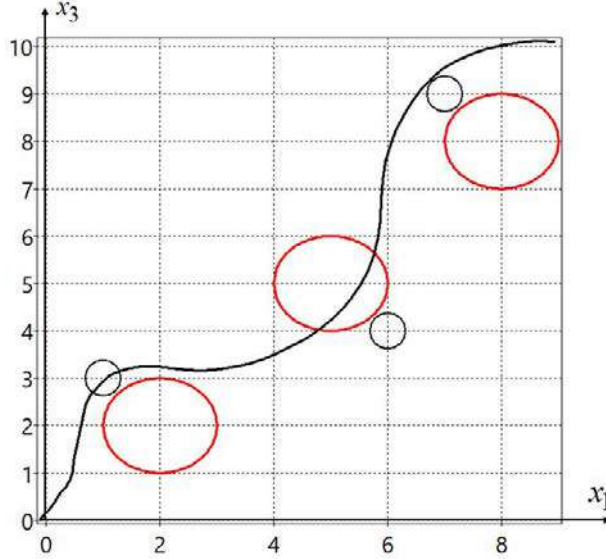


Рис. 2. Проекция траектории на горизонтальную плоскость при возмущении начального состояния

Как видим из рис. 2, квадрокоптер нарушил некоторые фазовые ограничения, не пролетел через все обязательные области и достиг терминального состояния с существенной ошибкой.

Для реализуемости полученного управления необходимо построить систему стабилизации движения объекта относительно заданной оптимальной траектории и получить функцию управления как функцию отклонения объекта от заданной траектории (11). Для этой цели используем метод сетевого оператора [12]. В задаче синтеза вместо одного начального состояния задаем несколько начальных состояний с небольшими отклонениями от исходного начального состояния (19)

$$\mathbf{x}^{0,i} = ((i)_3 - \mathbf{1}_3) \odot \Delta, \quad i = 0, \dots, K = 26, \quad (26)$$

где $(i)_3$ – трехкомпонентный троичный код числа i , $(i)_3 = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, $z_j \in \{0,1,2\}$, $j = 1,2,3$, $\mathbf{1}_3 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, \odot – адамарово покомпонентное произведение векторов, $\Delta = [\Delta_1 \ \Delta_2 \ \Delta_3 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. В задаче синтеза необходимо минимизировать следующий критерий качества

$$J_5 = \sum_{i=1}^K \left(\max_{t \in \{0, t_{f,i}\}} \|\mathbf{x}^*(t) - \mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i})\| + \tilde{p}_1 \|x^f - x(t_{f,i}, \mathbf{x}^{0,i})\| + \tilde{p}_2 \int_0^{t_{f,i}} \sum_{r=1}^M \vartheta(\varphi_r(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i}))) dt + \tilde{p}_3 \sum_{j=1}^N \min_{t \in \{0, t_{f,i}\}} \eta_j(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i})) \right) \rightarrow \min. \quad (27)$$

Синтез выполнялся при следующих значениях параметров: $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 0.2$, $\tilde{p}_1 = 1$, $\tilde{p}_2 = 3$, $\tilde{p}_3 = 0,8$. Метод сетевого оператора нашел следующее решение:

$$h_i(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = \begin{cases} u_i^+, & \text{если } u_i^+ \leq \tilde{h}_i(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}), \\ u_i^-, & \text{если } \tilde{h}_i(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) \leq u_i^-, \quad i = 1, \dots, 4, \\ \tilde{h}_i(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) - \text{иначе,} \end{cases} \quad (28)$$

где

$$\tilde{h}_1(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = A - C, \quad (29)$$

$$\tilde{h}_2(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = A - C - (A - C)^3 - q_3(x_3^* - x_3), \quad (30)$$

$$\tilde{h}_3(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = \rho_{19}(B) + \rho_{17}(q_1(x_1^* - x_1) + q_4(x_4^* - x_4)), \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \tilde{h}_4(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = & \tilde{h}_3^2(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) + \ln(\tilde{h}_2(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})) + \operatorname{sgn}(A)\sqrt{|A|} + \\ & + \rho_{19}(C) + \arctan(D) + \operatorname{sgn}(F) + \arctan(G) + \exp(q_2(x_2^* - x_2)) + \sqrt{|q_1|}, \end{aligned} \quad (32)$$

$$A = B + \tanh(x_1^* - x_1),$$

$$B = C + \mu(q_6(x_6^* - x_6) + q_6(x_6^* - x_6) + \operatorname{sgn}(q_3(x_3^* - x_3))),$$

$$C = \exp(D) + (q_6(x_6^* - x_6))^3 + \operatorname{sgn}(E)\sqrt{|E|} + \tanh(E) + \exp(G),$$

$$D = E + \tanh(F) + (q_6(x_6^* - x_6) + q_6(x_6^* - x_6))^3 + \rho_{18}(H) + \sin^2(q_5),$$

$$E = F + \sqrt[3]{x_3^* - x_3} + \sin(q_1(x_1^* - x_1) + q_4(x_4^* - x_4)),$$

$$F = G + \operatorname{sgn}(x_5^* - x_5) + (x_2^* - x_2)^3 + q_6(x_6^* - x_6) + q_6(x_6^* - x_6) + \operatorname{sgn}(q_3(x_3^* - x_3)) + \arctan(G) - H + \rho_{17}(q_4),$$

$$G = \rho_{17}(q_6(x_6^* - x_6) + q_6(x_6^* - x_6)) + H^3 + q_1(x_1^* - x_1) + q_4(x_4^* - x_4) + \vartheta(q_5(x_5^* - x_5)) + (x_5^* - x_5)^2,$$

$$H = \sin(q_6(x_6^* - x_6)) + q_5(x_5^* - x_5) + q_2(x_2^* - x_2) + \cos(q_1) + \cos(x_4^* - x_4) + \vartheta(x_2^* - x_2),$$

$$\rho_{17}(\alpha) = \operatorname{sgn}(\alpha)\ln(|\alpha| + 1),$$

$$\rho_{18}(\alpha) = \operatorname{sgn}(\alpha)(\exp(|\alpha|) - 1),$$

$$\rho_{19}(\alpha) = \operatorname{sgn}(\alpha)\exp(-|\alpha|),$$

$$\mu(\alpha) = \begin{cases} \alpha, & \text{если } |\alpha| < 1, \\ \operatorname{sgn}(\alpha) & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$q_1 = 11.9292, \quad q_2 = 1.93799, \quad q_3 = 1.0686, \quad q_4 = 8.14478, \quad q_5 = 14.70093, \quad q_6 = 14.17212.$$

С учетом полученной системы стабилизации математическая модель объекта управления имеет следующий вид:

$$\dot{x}_1 = x_4,$$

$$\dot{x}_2 = x_5,$$

$$\dot{x}_3 = x_6,$$

$$\dot{x}_4 = h_4(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})(\sin(h_3(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}))\cos(h_2(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}))\cos(h_1(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})) + \sin(h_1(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}))\sin(h_2(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}))),$$

$$\dot{x}_5 = h_4(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})\cos(h_3(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}))\cos(h_1(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})) - g, \quad (33)$$

$$\dot{x}_6 = h_4(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})(\cos(h_2(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}))\sin(h_1(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})) - \cos(h_1(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}))\sin(h_2(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}))\sin(h_3(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}))),$$

$$\dot{x}_1^* = x_4^*,$$

$$\dot{x}_2^* = x_5^*,$$

$$\dot{x}_3^* = x_6^*,$$

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

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

$$\dot{x}_6^* = u_4 (\cos(u_2) \sin(u_1) - \cos(u_1) \sin(u_2) \sin(u_3)) .$$

В модели двенадцать уравнений, первые шесть уравнений описывают математическую модель объекта управления с системой стабилизации движения вдоль заданной траектории. Управлением в модели является программная траектория. Остальные шесть уравнений описывают эталонную модель, которая интегрируется в бортовом процессоре объекта управления. В результате решения этих шести уравнений получаем программную траектория, которая подается в систему стабилизации объекта управления.

Для данной модели решим ту же задачу оптимального управления (18)–(21) и найдем функцию управления как функцию времени, но в данном случае эта функция управления будет реализуемой, так как она предназначена для генерации программной траектории, а объект уже располагает функцией обратной связи.

Для решения используем также разбиение оси времени на равные интервалы, и для каждой компоненты управления – нахождение значений параметров на границах интервалов.

Для решения задачи используем тот же гибридный эволюционный алгоритм, который нашел следующее решение: $\mathbf{q}^* = [-5.13794 \ -15.49724 \ -12.82804 \ 12.59093 \ -6.68684 \ -4.67768 \ 0.68512 \ 15.72163 \ -17.54256 \ 4.81652 \ 8.60023, \ 19.65063 \ -12.71387 \ 3.21392 \ -15.15816 \ -3.27893 \ 17.29348 \ -8.31660 \ -10.32430 \ 19.95503 \ 1.12409, \ 16.53391 \ -13.66277 \ 18.39568 \ 2.08472 \ 17.64254 \ 1.84001 \ 8.94204 \ -17.68099 \ 8.30836 \ -2.29860 \ 18.45229 \ 3.35038 \ -0.00510 \ 19.45802 \ 10.43963 \ -19.64614 \ -10.91143 \ 0.08173 \ 6.84413 \ -14.49671 \ -11.97947 \ 17.76482 \ 14.42123 \ 4.97627 \ -9.00329 \ -11.25190 \ 19.07408 \ 4.46671 \ -19.23971 \ -0.98305 \ 4.94638 \ 12.82386 \ -3.02202 \ -0.66751 \ 19.55158 \ -12.79522 \ -0.08963 \ -1.66648, \ 5.24520 \ -9.95307 \ 0.51696 \ -6.12214 \ 17.82393 \ 0.00000 \ 0.95714 \ -1.12028, \ 6.90519]^T$.

На рис. 3 приведены графики проекций траекторий движения объекта (33) из восьми различных начальных условий, которые были выбраны как максимально допустимые возмущения начального состояния (26) на величину 0,2 от исходного начального состояния (19).

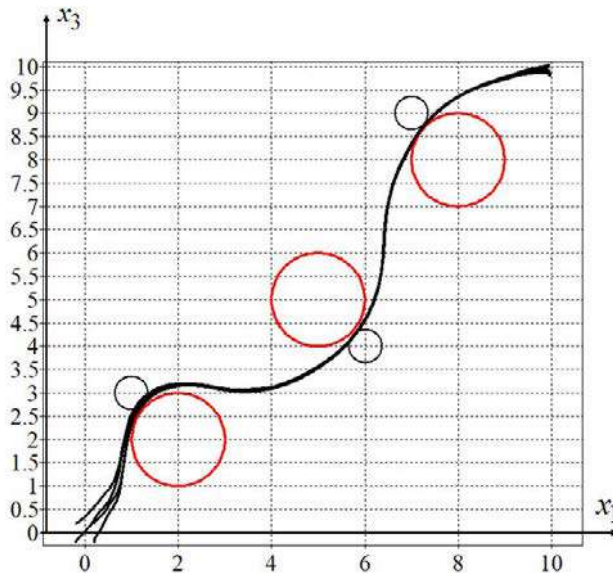


Рис. 3. Проекция траекторий на горизонтальную плоскость из восьми начальных состояний

Как видно из графиков, система стабилизации (28) движения объекта вдоль заданной программной траектории обеспечила существование окрестности оптимальной траектории со свойствами притяжения, что обеспечивает практическую реализуемость полученного решения в реальном объекте управления.

Система стабилизации синтезирована для обеспечения движения объекта относительно некоторой найденной ранее оптимальной траектории, хотя траектория была найдена после решения

задачи синтеза и построения модели (33). Очевидно, что такая система стабилизации (28) может использоваться для стабилизации движения объекта относительно других траекторий некоторого класса.

Изменим задачу оптимального управления за счет изменения положения областей обязательного пролета квадрокоптера. Пусть в задаче оптимального управления (33), (18) – (21) изменены координаты центров областей обязательного пролета квадрокоптера: $g_{1,1} = 3$, $g_{1,2} = 5$, $g_{1,3} = 1$, $g_{2,1} = 4$, $g_{2,2} = 5$, $g_{2,3} = 6$, $g_{3,1} = 9$, $g_{3,2} = 5$, $g_{3,3} = 7$. Данные изменения должны заставить квадрокоптер пролететь по новой траектории. Проверим, сможет ли синтезированная система стабилизации обеспечить движение квадрокоптера по новой траектории.

Решим новую задачу оптимального управления. В результате было найдено следующее решение: $\mathbf{q}^* = [17.88421 \ -18.99638 \ -3.10578 \ 17.44883 \ -17.74250 \ 17.172016 \ -16.16878, \ 19.72185 \ -10.41619 \ -16.41715 \ -19.11392 \ 18.47060 \ 19.00219 \ -0.36495 \ 16.03874 \ -2.63710 \ -17.67803 \ -14.90955 \ 8.61284 \ 17.39112 \ -15.367370 \ 15.18712 \ 15.42160 \ 19.56070 \ 0.02435 \ 2.15191 \ -17.26005 \ 18.56314 \ 3.23809 \ -4.05828 \ -5.15527 \ 12.58340 \ 2.55186 \ -15.71949 \ -5.26035 \ 19.10096 \ 14.93652 \ -16.36946 \ -7.13979 \ 16.42151 \ 0.94527 \ 1.80694 \ -17.37248 \ 0.11103 \ -13.45214 \ 15.20876 \ 7.83547 \ 11.28632 \ -13.54579 \ 6.29187 \ 7.11718 \ 17.68948 \ 1.60379 \ 6.96692 \ 0.03372 \ 19.21870 \ 83.28655, \ 3.74266, \ 12.16980, \ 17.97492 \ 3.43564 \ 10.26265 \ -4.85516 \ 18.64589 \ 0.64871 \ -0.04993 \ -2.60517 \ -0.93611]^T$.

На рис. 4 приведены проекции траекторий движения квадрокоптера из восьми предельно отклоненных от исходного начального состояния для новой программной траектории.

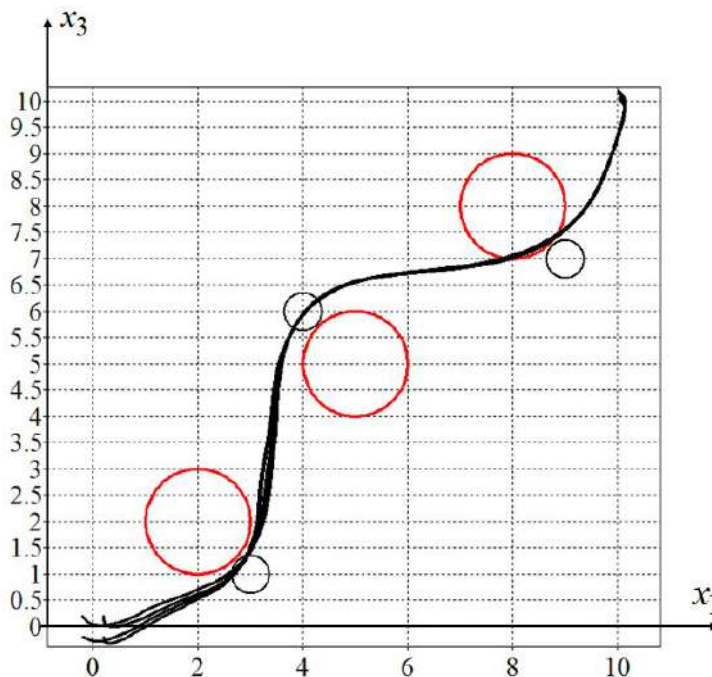


Рис. 4. Проекция траекторий на горизонтальную плоскость из восьми начальных состояний для нового программного управления

Как видно из рисунка, синтезированная система стабилизации (28), несмотря на то, что была получена для движения объекта в окрестности одной программной траектории, обеспечивает движение объекта в окрестности новой, другой программной траектории.

Заключение

В работе экспериментально показано, что возможно синтезировать универсальную систему стабилизации, которая может обеспечить движение объекта относительно заданных траекторий определенного класса. Решение задачи оптимального управления для модели объекта управления с системой стабилизации движения в окрестности заданной траектории позволяет найти прямым методом функцию управления в классе практически реализуемых функций.

Список литературы

1. Дивеев А. И. Уточнение задачи оптимального управления для практической реализации ее решения // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2023. Т. 509. С. 36–45.
2. Diveev A. I., Sofronova E. A. Universal Stabilisation System for Control Object Motion along the Optimal Trajectory // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. P. 3556.
3. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М. : Наука, 1983. 393 с.
4. Brockett R. W. Asymptotic Stability and Feedback Stabilization. *Differential Geometric Control Theory* / ed. by R. W. Brockett, R. S. Millman, H. J. Sussmann. Boston : Birkhauser, 1983. P. 181–191.
5. Walsh G., Tilbury D., Sastry S. [et al.]. Stabilization of Trajectories for Systems with Nonholonomic Constraints // *IEEE Trans. Autom. Control*. 1994. Vol. 39. P. 216–222.
6. Samir A., Hammad A., Hafez A., Mansour H. Quadcopter Trajectory Tracking Control using State-Feedback Control with Integral Action // *Int. J. Comput. Appl.* 2017. Vol. 168. P. 1–7.
7. Nguyen A. T., Xuan-Mung N., Hong S-K. Quadcopter Adaptive Trajectory Tracking Control: A New Approach via Backstepping Technique // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 3873. P. 1–17.
8. Mohamed M. J., Abbas M. Y. Design a Fuzzy PID Controller for Trajectory Tracking of Mobile Robot // *Eng. Technol. J.* 2018. Vol. 36A. P. 100–110.
9. Ma T., Wong S. Trajectory Tracking Control for Quadrotor. UAV // *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (5–8 dec. 2017) : proceedings*. Macau, Macao, 2017.
10. Diveev A., Sofronova E. Synthesized Control for Optimal Control Problem of Motion Along the Program Trajectory // *8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT) (Istanbul, Turkey, 17–20 May 2022) : proceedings*. Istanbul, 2022. P. 475–480.
11. Diveev A., Sofronova E., Konyrbaev N., Bexeitova A. Stabilization of Movement Along an Optimal Trajectory and Its Solution // *Eng. Proc.* 2023. Vol. 33. P. 12.
12. Diveev A. I. Sofronova E. A. The network operator method for search of the most suitable mathematical equation. *Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications*. Rijeka, Croatia : InTech, 2012. P. 19–42.
13. Diveev A., Kazaryan D., Sofronova E. Symbolic regression methods for control system synthesis // *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2014 (Palermo, Italy, 16–19 June 2014) : proceedings*. Palermo, 2014. P. 587–592.
14. Diveev A. Hybrid Evolutionary Algorithm for Optimal Control Problem *Intelligent Systems and Applications // IntelliSys 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham, Switzerland : Springer, 2023. Vol. 543. P. 726–738.
15. Diveev A. I., Shmalko E. Yu. Synthesis of a mobile robot control system using the method of intellectual evolution // *Reliability and quality of complex systems*. 2013. № 3. P. 52–59.
16. Diveev A. I., Kotova A. A. Evolutionary method for solving the optimal control problem to improve the quality of group interaction of robots // *Reliability and quality of complex systems*. 2019. № 4. P. 60–68.

References

1. Diveev A.I. Clarification of the optimal control problem for the practical implementation of its solution. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Matematika, informatika, protsessy upravleniya = Reports of the Russian Academy of Sciences. Mathematics, computer science, management processes*. 2023;509:36–45. (In Russ.)
2. Diveev A.I., Sofronova E.A. Universal Stabilisation System for Control Object Motion along the Optimal Trajectory. *Mathematics*. 2023;11:3556.
3. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov = Mathematical theory optimal processes*. Moscow: Nauka, 1983:393. (In Russ.)
4. Brockett R.W. *Asymptotic Stability and Feedback Stabilization. Differential Geometric Control Theory*. Boston: Birkhauser, 1983:181–191.
5. Walsh G., Tilbury D., Sastry S. et al. Stabilization of Trajectories for Systems with Nonholonomic Constraints. *IEEE Trans. Autom. Control*. 1994;39:216–222.
6. Samir A., Hammad A., Hafez A., Mansour H. Quadcopter Trajectory Tracking Control using State-Feedback Control with Integral Action. *Int. J. Comput. Appl.* 2017;168:1–7.
7. Nguyen A.T., Xuan-Mung N., Hong S-K. Quadcopter Adaptive Trajectory Tracking Control: A New Approach via Backstepping Technique. *Appl. Sci.* 2019;3873:1–17.
8. Mohamed M.J., Abbas M.Y. Design a Fuzzy PID Controller for Trajectory Tracking of Mobile Robot. *Eng. Technol. J.* 2018;36A:100–110.
9. Ma T., Wong S. Trajectory Tracking Control for Quadrotor. UAV. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (5–8 dec. 2017): proceedings*. Macau, Macao, 2017.
10. Diveev A., Sofronova E. Synthesized Control for Optimal Control Problem of Motion Along the Program Trajectory. *8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT) (Istanbul, Turkey, 17–20 May 2022): proceedings*. Istanbul, 2022:475–480.

11. Diveev A., Sofronova E., Konyrbaev N., Bexeitova A. Stabilization of Movement Along an Optimal Trajectory and Its Solution. *Eng. Proc.* 2023;33:12.
12. Diveev A.I. Sofronova E.A. *The network operator method for search of the most suitable mathematical equation. Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications.* Rijeka, Croatia: InTech, 2012:19–42.
13. Diveev A., Kazaryan D., Sofronova E. Symbolic regression methods for control system synthesis. *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2014 (Palermo, Italy, 16–19 June 2014): proceedings.* Palermo, 2014:587–592.
14. Diveev A. Hybrid Evolutionary Algorithm for Optimal Control Problem Intelligent Systems and Applications. *IntelliSys 2022. Lecture Notes in Networks and Systems.* Cham, Switzerland: Springer, 2023;543:726–738.
15. Diveev A.I., Shmalko E.Yu. Synthesis of a mobile robot control system using the method of intellectual evolution. *Reliability and quality of complex systems.* 2013;(3):52–59.
16. Diveev A.I., Kotova A.A. Evolutionary method for solving the optimal control problem to improve the quality of group interaction of robots. *Reliability and quality of complex systems.* 2019;(4):60–68.

Информация об авторах / Information about the authors

Асхат Ибрагимович Дивеев

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44)
E-mail: aidiveev@mail.ru

Елена Анатольевна Софронова

кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44)
E-mail: sofronova_ea@mail.ru

Askhat I. Diveev

Doctor of technical sciences, professor, head researcher,
Federal Research Center "Computer Science
and Control" of the Russian Academy of Sciences
(44 Vavilova street, Moscow, Russia)

Elena A. Sofronova

Candidate of technical sciences,
associate professor, senior researcher,
Federal Research Center "Computer Science
and Control" of the Russian Academy of Sciences
(44 Vavilova street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 16.07.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.10.2023

Принята к публикации / Accepted 06.11.2023

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

Е. Ю. Шмалько

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

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

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

Для цитирования: Шмалько Е. Ю. Машинное обучение систем управления с обратной связью на базе принципа синтезированного оптимального управления // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 18–29. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-2

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

E.Yu. Shmalko

Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
e.shmalko@gmail.ru

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

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

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

For citation: Shmalko E.Yu. Machine learning of control systems with feedback based on the principle of synthesized optimal control. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):18–29. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-2

Введение

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

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

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

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

Общая задача синтеза была сформулирована еще в начале 1960-х гг. Беллманом [2], когда непрерывная по времени нелинейная задача оптимального управления решалась через уравнение Гамильтона – Якоби – Беллмана (НJB), представляющего собой нелинейное дифференциальное

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

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

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

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

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

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

Машинное обучение системы управления с обратной связью

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

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

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

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

Для системы (1) заданы начальные и терминальные условия

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

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

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

Задан критерий качества управления в виде интегрального функционала

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

Необходимо найти функцию управления в виде

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

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

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

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

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

Тогда введем следующее определение.

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

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

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

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

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

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

выполняются следующие условия:

если

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

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

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

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

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

достигать заданной цели (3) с оптимальным значением критерия качества (4) и получить требуемые свойства (8) и (9).

Принцип синтезированного оптимального управления

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Матрица Якоби

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

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

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

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

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

С вычислительной точки зрения, чтобы обеспечить системе существование устойчивой точки равновесия $\tilde{\mathbf{x}}$, решается задача синтеза функции управления. Для этого необходимо задать область определения $X \in \mathbb{R}^n$ и затем определить точку равновесия $\tilde{\mathbf{x}}$. Если точка равновесия равна точке \mathbf{x}^* , то функция управления ищется в виде (10), где $\mathbf{x}^* = \tilde{\mathbf{x}}$. Таким образом, решается задача синтеза (1) – (5) с заданным терминальным состоянием $\mathbf{x}^f = \tilde{\mathbf{x}}$, с определенной областью возможных начальных состояний $X_0 \subset X$ и критерием качества

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

где a_1 – весовой коэффициент,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

доставляющую минимум функционалу

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

Найденное управление

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

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

Вычислительный эксперимент

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

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

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

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

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

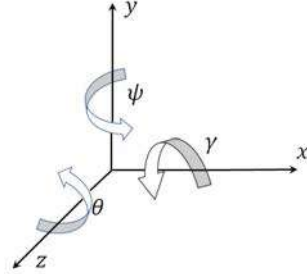


Рис. 1. Система координат квадрокоптера

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

В результате получается следующая математическая модель:

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

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

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

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

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

Тогда математическая модель пространственного движения квадрокоптера имеет следующий вид:

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

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

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

Задано начальное положение квадрокоптера:

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

Определено целевое терминальное состояние:

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

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

Фазовые ограничения заданы в виде цилиндров:

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

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

Функционал качества задан в следующем виде:

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

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

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

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

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

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

```

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

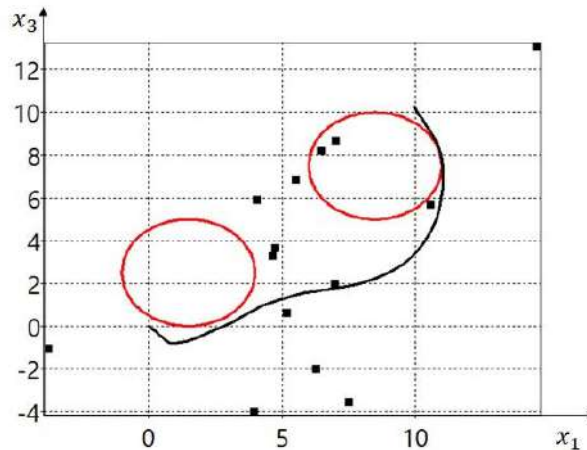


Рис. 3. Проекция движения квадрокоптера на горизонтальную плоскость.
Черными квадратами изображены проекции найденных управляющих точек равновесия

Заключение

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

Список литературы

1. Egerstedt M. Motion Planning and Control of Mobile Robots : Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden, 2000.
2. Беллман Р. Динамическое программирование. М. : Изд-во иностранной литературы, 1960. 400 с.
3. Jones M., Peet M. M. A generalization of Bellmans equation with application to path planning, obstacle avoidance and invariant set estimation // Automatica. 2021. Vol. 127. P. 109510.
4. Aguilar C. O., Krener A. J. Numerical solutions to the Bellman equation of optimal control // J. Optim. Theory Appl. 2014. Vol. 160. P. 527–552.
5. Fraga S. L., Pereira F. L. Hamilton-Jacobi-Bellman Equation and Feedback Synthesis for Impulsive Control // IEEE Trans. Autom. Control. 2012. Vol. 57. P. 244–249.
6. Liu D., Xue S., Zhao B. [et al.]. Adaptive Dynamic Programming for Control: A Survey and Recent Advances // IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst. 2021. Vol. 51. P. 142–160.
7. Lewis F. L., Vrabie D., Vamvoudakis K. G. Reinforcement learning and feedback control: Using natural decision methods to design optimal adaptive controllers // IEEE Control Syst. 2012. Vol. 32. P. 76–105.
8. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. М. : Наука, 1969. 408 с.
9. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М. : Наука, 1978. 488 с.
10. Walsh G., Tilbury D., Sastry S. [et al.]. Stabilization of trajectories for systems with nonholonomic constraints // IEEE Trans. Autom. Control. 1994. Vol. 39. P. 216–222. doi: 10.1109/9.273373

11. Шмалько Е. Ю. Машинно-синтезированное управление нелинейным динамическим объектом на основе оптимального расположения точек равновесия // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22, № 1. С. 87–109.
12. Wang S., Dai M., Wang Y. Robust Adaptive Backstepping Sliding Mode Control for a Class of Uncertain Nonlinear System // Proceedings of the 2018 Chinese Automation Congress (CAC) (Xi'an, China, 30 November – 2 December 2018). Xi'an, China, 2018. P. 3534–3538. doi: 10.1109/CAC.2018.8623057
13. Clarke F. Lyapunov Functions and Feedback in Nonlinear Control // Optimal Control, Stabilization and Nonsmooth Analysis / ed. by M. S. de Queiroz, M. Malisoff, P. Wolenski. LNCIS 301. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2004. P. 267–282.
14. Уткин А. В., Уткин В. А. Синтез систем стабилизации при односторонних ограничениях на управляющие воздействия // Проблемы управления. 2020. № 3. С. 3–13.
15. Cherroun L., Nadour M., Kouzou A. Type-1 and Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Autonomous Robotic Motion // Proceedings of the 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAID) (Elazig, Turkey, 25–27 September 2019). Elazig, Turkey, 2019. P. 1–5.
16. Ahmed A. A., Alshandoli A. F. S. On replacing a PID controller with Neural Network controller for Segway // Proceedings of the 2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE) (Takamatsu, Japan, 28 June – 2 July 2020). Takamatsu, Japan, 2020. P. 1–4. doi: 10.1109/ICEE49691.2020.9249811
17. Diveev A. I., Shmalko E. Yu. Machine-Made Synthesis of Stabilization System by Modified Cartesian Genetic Programming // IEEE Trans. Cybern. 2022. Vol. 52. P. 6627–6637. doi: 10.1109/TCYB.2020.3039693
18. Румянцев Ю. А., Шмалько Е. Ю., Ямшанов К. Л. Синтез контроллера обратной связи методом сетевого оператора для мобильного робота Rosbot в имитационной среде Gazebo // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. 2022. № 24. С. 98–109.
19. Shmalko E., Diveev A. Control synthesis as machine learning control by symbolic regression methods // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11 (12), № 5468.
20. Малкин И. Г. Теория устойчивости движения. 4-е изд. М. : URSS, 2017. 432 с.
21. Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю. Метод синтезированного оптимального управления для группы роботов // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 4. С. 40–47.
22. Shmalko E. Feasibility of Synthesized Optimal Control Approach on Model of Robotic System with Uncertainties // Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies / ed. by A. Ronzhin, V. Shishlakov. Vol 232. Singapore : Springer, 2022. 508 p.
23. Diveev A., Shmalko E. Symbolic Regression Methods. In: Machine Learning Control by Symbolic Regression. Springer, Cham, 2021.
24. Программный модуль сетевого оператора. URL: https://github.com/KostyaYamshanov/Machine-Learning-Control-kit/tree/main/network_operator
25. Шмалько Е. Ю., Румянцев Ю. А. Численное решение задачи оптимального управления методом роя частиц на основе нейросетевой модели // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 108–110.

References

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

12. Wang S., Dai M., Wang Y. Robust Adaptive Backstepping Sliding Mode Control for a Class of Uncertain Nonlinear System. *Proceedings of the 2018 Chinese Automation Congress (CAC) (Xi'an, China, 30 November – 2 December 2018)*. Xi'an, China, 2018:3534–3538. doi: 10.1109/CAC.2018.8623057
13. Clarke F. Lyapunov Functions and Feedback in Nonlinear Control. *Optimal Control, Stabilization and Nonsmooth Analysis*. LNCIS 301. Berlin; Heidelberg: Springer, 2004:267–282.
14. Utkin A.V., Utkin V.A. Synthesis of stabilization systems with unilateral restrictions on control actions. *Problemy upravleniya = Management problems*. 2020;(3):3–13. (In Russ.)
15. Cherroun L., Nadour M., Kouzou A. Type-1 and Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Autonomous Robotic Motion. *Proceedings of the 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID) (Elazig, Turkey, 25–27 September 2019)*. Elazig, Turkey, 2019:1–5.
16. Ahmed A.A., Alshandoli A.F.S. On replacing a PID controller with Neural Network controller for Segway. *Proceedings of the 2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE) (Takamatsu, Japan, 28 June – 2 July 2020)*. Takamatsu, Japan, 2020:1–4. doi: 10.1109/ICEE49691.2020.9249811
17. Diveev A.I., Shmalko E.Yu. Machine-Made Synthesis of Stabilization System by Modified Cartesian Genetic Programming. *IEEE Trans. Cybern.* 2022;52:6627–6637. doi: 10.1109/TCYB.2020.3039693
18. Romyantsev Yu.A., Shmal'ko E.Yu., Yamshanov K.L. Synthesis of a feedback controller by a network operator method for a mobile robot Rosbot in an imitation environment of Gazebo. *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti system = Questions of the theory of safety and stability of systems*. 2022;(24):98–109. (In Russ.)
19. Shmalko E., Diveev A. Control synthesis as machine learning control by symbolic regression methods. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(5468).
20. Malkin I.G. *Teoriya ustoychivosti dvizheniya. 4-e izd = Theory of motion stability. 4th ed.* Moscow: URSS, 2017:432. (In Russ.)
21. Diveev A.I., Shmal'ko E.Yu. The method of synthesized optimal control for a group of robots. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(4):40–47. (In Russ.)
22. Shmalko E. Feasibility of Synthesized Optimal Control Approach on Model of Robotic System with Uncertainties. *Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Vol 232. Singapore: Springer, 2022:508.
23. Diveev A., Shmalko E. Symbolic Regression Methods. *Machine Learning Control by Symbolic Regression*. Springer, Cham, 2021.
24. *Programmnyy modul' setevogo operatora*. Available at: https://github.com/KostyaYamshanov/Machine-Learning-Control-kit/tree/main/network_operator
25. Shmal'ko E.Yu., Romyantsev Yu.A. Numerical solution of the optimal control problem by the particle swarm method based on a neural network model. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:108–110. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Елизавета Юрьевна Шмалько

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела роботизированного управления, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44); доцент кафедры робототехнических систем и мехатроники, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)
E-mail: e.shmalko@gmail.ru

Elizaveta Yu. Shmalko

Candidate of technical sciences, senior researcher of the department of robotic control, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences (44 Vavilova street, Moscow, Russia); associate professor of the sub-department of robotic systems and mechatronics, Bauman Moscow State Technical University (build. 4, 5 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 17.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2023

Принята к публикации/Accepted 06.11.2023

СТАТИСТИЧЕСКИЕ И СЕМАНТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТЕНДЕНЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ, ТРАНСПОРТИРОВКЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

В. Р. Роганов¹, В. В. Швыров²

¹ Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

² Луганский государственный педагогический университет, Луганск, Россия

¹ Vladimir_roganov@mail.ru, ² slavik.asas@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* 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. *Материалы и методы.* В данной работе представлен анализ публикаций с использованием современных методов статистического и семантического анализа больших данных. *Результаты и выводы.* В частности, на основании данных частотного анализа определены латентные тенденции в области исследований, связанных с водоугольным топливом, выделены методы утилизации водоугольных суспензий, факторы, определяющие реологические свойства водоугольного топлива. Кроме того, произведена классификация исследований по видам углей.

Ключевые слова: уголь, водоугольное топливо, суспензия, газификация, сжигание, транспортирование, топливоподготовка, статистические анализ, семантический анализ

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-10046, <https://rscf.ru/project/23-21-10046>

Для цитирования: Роганов В. Р., Швыров В. В. Статистические и семантические методы анализа тенденций в производстве, транспортировке и использовании водоугольного топлива // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 30–39. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-3

STATISTICAL AND SEMANTIC METHODS OF ANALYZING TRENDS IN PRODUCTION, TRANSPORTATION AND THE USE OF COAL-WATER FUEL

V.R. Roganov¹, V.V. Shvyrov²

¹ Penza State Technological University, Penza, Russia

² Lugansk State Pedagogical University, Lugansk, Russia

¹ Vladimir_roganov@mail.ru, ² slavik.asas@mail.ru

Abstract. *Background.* The increase in the number of publications on the production and use of coal-water suspensions is due to the global increase in energy consumption, rising energy prices, as well as the needs to expand the fuel base in modern energy. On the other hand, interest in this area is associated with the issues of disposal of accumulated coal waste. In this regard, the task of systematizing and classifying the approaches proposed by various authors in the field of effective use of coal-water suspensions and coal-water fuel becomes urgent. *Materials and methods.* This paper presents an analysis of publications using modern methods of statistical and semantic analysis of big data. *Results and conclusions.* In particular, based on frequency analysis data, latent trends in the field of research related to coal-water fuel have been identified, methods for recycling water-coal fuel, and factors that determine the rheological properties of water-coal fuel have been identified. In addition, a classification of studies by type of coal was made.

Keywords: coal, coal-water fuel, suspension, gasification, combustion, transportation, fuel preparation, statistical analysis, semantic analysis

Financing: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-21-10046, <https://rscf.ru/project/23-21-10046>

For citation: Roganov V.R., Shvyrov V.V. Statistical and semantic methods of analyzing trends in production, transportation and the use of coal-water fuel. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4): 30–39. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-3

Введение

Задачи утилизации отходов угольной промышленности, а также повышения эффективности переработки таких отходов крайне актуальны в связи с ростом цен на энергоносители и общей тенденцией поиска новых видов энергетических топлив. Необходимость решения этих задач обуславливает рост количества фундаментальных и прикладных исследований в области использования водоугольного топлива, а также водоугольных суспензий. Всесторонний обзор публикаций в области подготовки, транспортирования и использования водоугольного топлива (ВУТ) представлен в работе [1]. Анализ исследований, связанных с вопросами газификации водоугольных сред, можно найти в обзорной работе [2].

Говоря о фундаментальных исследованиях в области ВУТ, следует отметить ряд работ В. И. Мурко, В. И. Федяева, Д. А. Дзюбы [3]. Вопросами транспортировки и использования ВУТ занимался целый ряд ученых, среди них М. П. Баранова [4], В. С. Белецкий [5–8], А. Ю. Радзюк [2], Г. Н. Делягин [8], А. А. Круть [9, 10] и др.

В связи со значительным интересом к данной тематике и растущим числом публикаций становится актуальной задача систематизации материала, классификации предложенных методов по различным направлениям исследований и аспектам организации использования, транспортирования, приготовления ВУТ.

Поиск по ключевому слову «водоугольное топливо» на ресурсе научной электронной библиотеки «КиберЛенинка» [11] выдает более 300 публикаций релевантных выбранной тематике.

Целью данной работы является анализ корпуса публикаций релевантных тематике приготовления, транспортирования и использования водоугольного топлива на основании современных методов информационного поиска, дистрибутивно-статистического и семантического анализа, методов обработки больших данных, а также развитие указанных методов с учетом специфики предметной области.

Исследование должно дать ответы на следующие вопросы:

1. Какие направления исследований в сфере ВУТ представлены в релевантных тематике ВУТ публикациях?
2. Какие способы утилизации водоугольных суспензий (ВУС) наиболее релевантны исследуемой тематике?
3. Какие виды углей рассматриваются в работах по ВУТ?
4. Какие факторы, определяющие реологические свойства ВУТ, наиболее релевантны работам по тематике ВУТ?

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- разработать программные средства для автоматизации информационного поиска и анализа публикаций;
- выполнить анализ заголовков публикаций для формирования семантического ядра из ключевых слов максимально релевантных тематике ВУТ;
- выполнить анализ корпуса публикаций с использованием методов частотного анализа и статистических методов;
- выполнить систематизацию, классификацию и визуализацию полученных результатов.

Следует отметить, что методы информационного поиска и семантического анализа развивались в работах [12, 13]. Техника информационного поиска – в работе [14]. В качестве примера использования статистических методов анализа к исследованию публикаций можно привести работу [15], в которой авторы использовали методы частотного анализа и статистические методы в исследовании проблем и методов решения задачи SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), а также развивали технику анализа больших корпусов данных.

Материалы и методы

Большое число публикаций по исследуемой тематике дает возможность использовать современные методы информационного поиска и анализа больших данных. С другой стороны, подобный анализ невозможен без соответствующих программных средств.

В качестве источника выбрана научная электронная библиотека КиберЛенинка, которая построена на парадигме открытой науки (Open Science). На рис. 1 представлена страница поиска данного ресурса по ключевому запросу «водоугольное топливо».

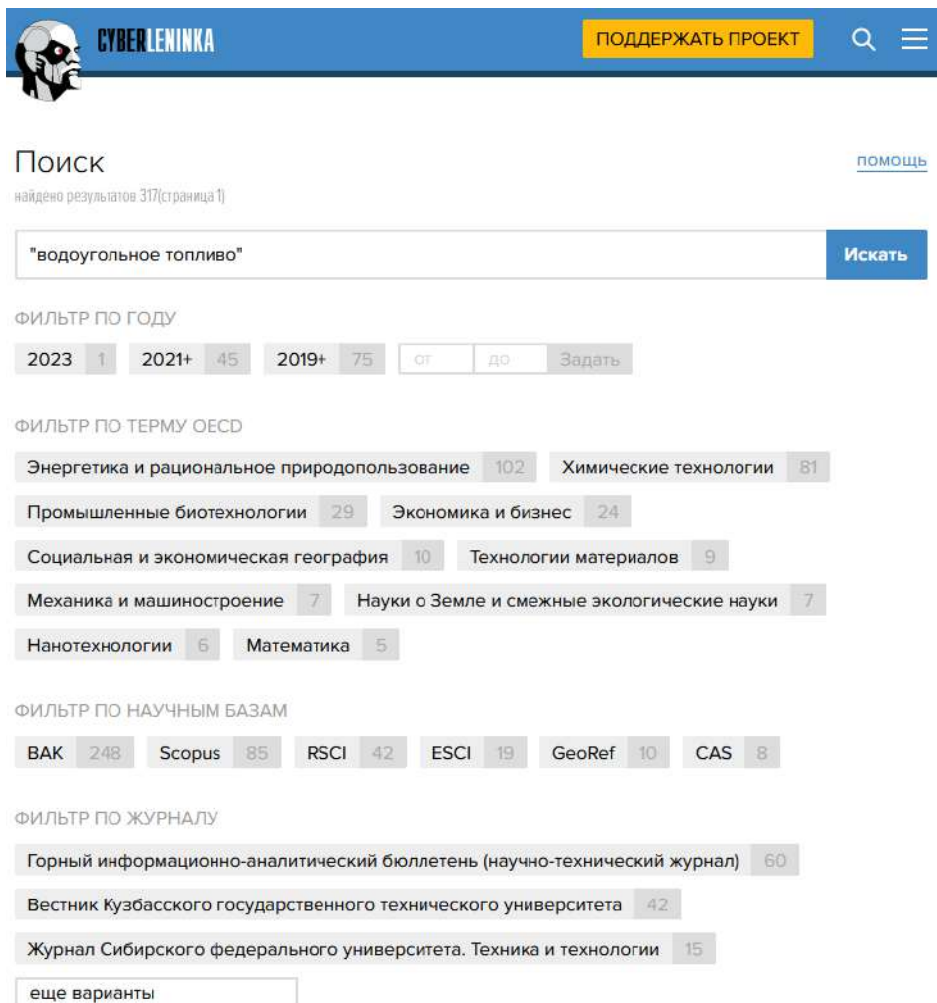


Рис. 1. Страница поиска библиотеки КиберЛенинка по ключевому запросу «водоугольное топливо»

Анализ веб-страницы показал, что результаты поиска содержат ссылки на веб-страницу каждой найденной публикации, а также сам заголовок публикации, автора и аннотацию (рис. 2).

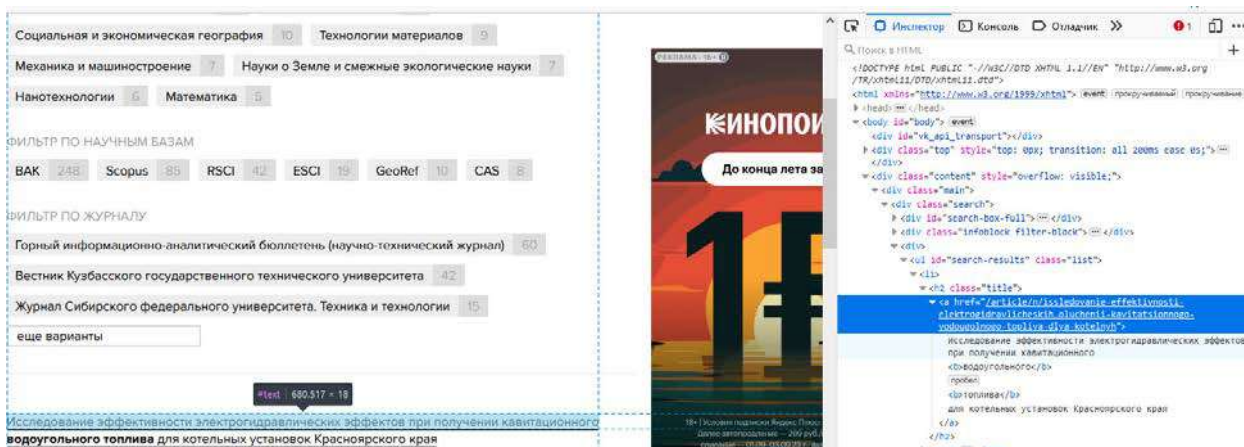


Рис. 2. Поиск ссылки на веб-страницу соответствующей публикации

Кроме того, каждая веб-страница публикации имеет строгую структуру (рис. 3).

Анализ структуры вложенных тэгов показал, что возможна автоматизация процесса парсинга страницы поиска, а также автоматизация загрузки необходимых для исследования публикаций. Для разработки программного средства выбран язык Python, а также ряд дополнительных библиотек для загрузки документов и извлечения гиперссылок, в частности, библиотека BeautifulSoup 4 [12],

а также Selenium WebDriver для получения контента веб-страниц [13] и загрузки самих публикаций. Таким образом, получен корпус публикаций по тематике водоугольного топлива, состоящий из 310 работ в формате pdf, а также списки заголовков и аннотаций данных работ.

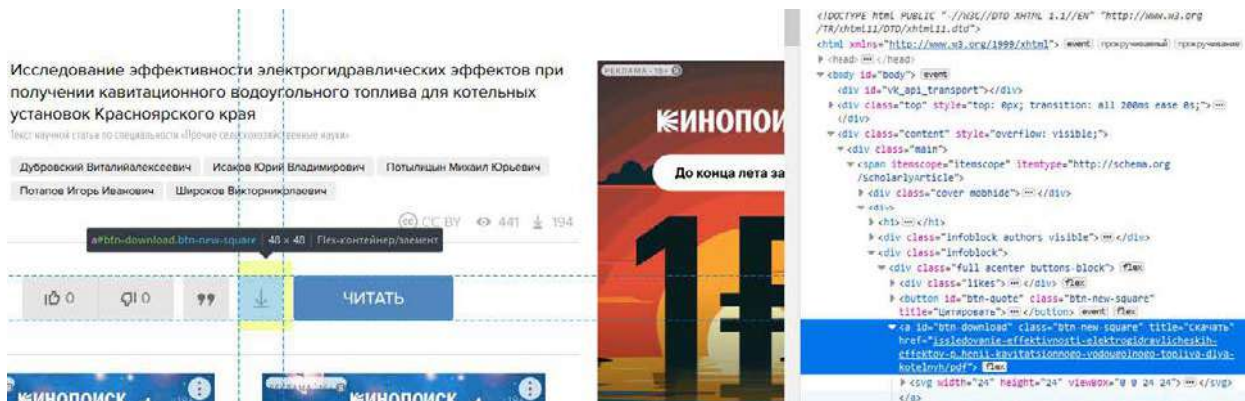


Рис. 3. Исследование веб-страницы публикации на сайте КиберЛенинка

Для выполнения частотного анализа разработано приложение на языке Python, с использованием библиотек tkinter – для реализации простого кнопочного интерфейса приложения, Keras – для обработки данных и токенизации слов и подсчета частот, PyPDF – для чтения данных из формата pdf. Внешний вид приложения представлен на рис. 4.

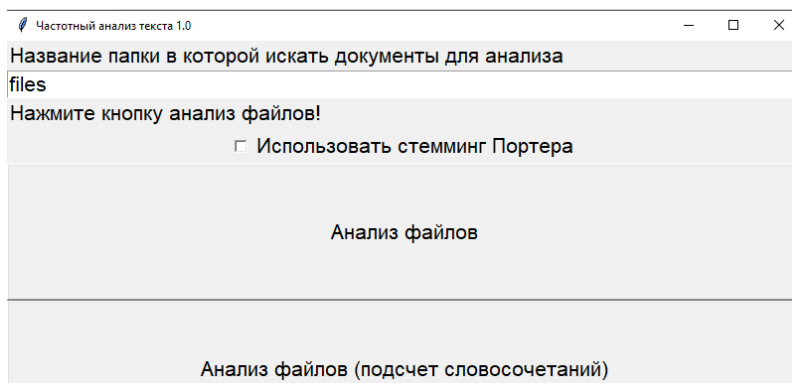


Рис. 4. Интерфейс приложения

Реализованы возможности подсчета как частот одиночных слов, так и подсчет биграмм (словосочетаний двух слов), а также возможность использования стемминга Портера [13]. Результатом работы приложения является файл *.xlsx, в котором содержится таблица частот слов или биграмм для всех документов в заданной директории. Общее число слов для корпуса заголовков и аннотаций к публикациям составило 14 065, в том числе 4542 различных слов или словоформ.

Для оценки значимости слова в контексте исследуемого корпуса публикаций может быть использована не только абсолютная частота, но и статистические меры TF-IDF [14]. Мера TF (term frequency) частота слова – отношение числа вхождений в корпус слова t_i к общему числу слов в документе:

$$TF(t, d) = \frac{n_t}{\sum_k n_k},$$

где n_t – число вхождений слова t .

Результаты

Частотный анализ корпуса публикаций, а также детальный семантический анализ свидетельствует о возможности группировки публикаций по укрупненным направлениям. В связи со

значительным числом работ по данной тематике результаты анализа представлены в таблице в виде направлений исследований, кроме того, приведены ссылки на работы, которые можно отнести к данному направлению (табл. 1).

Таблица 1

Направления исследований по тематике ВУТ

Направление	Характеризующие ключевые слова	Ссылки на публикации
Эколого-экономические аспекты использования водоугольного топлива (тематика публикаций связана с различными экологическими и экономическими аспектами сжигания, утилизации шламов, ВУС, ВУТ, общими вопросами экологической безопасности, а также влиянием угольной промышленности на окружающую среду)	«Экология», «Экономика»	[16–27]
Вопросы транспортирования ВУТ	«Транспортирование»	[28–33]
Конструкции, предложения и особенности функционирования котлов для использования ВУТ (изучаются возможности эффективного использования ВУТ в котельных установках малой мощности)	«Котел», «Котельная»	[34–38]
Особенности процессов, связанных с приготовлением ВУС и ВУТ	«Приготовление»	[39–45]
Разработка и исследование математических и физико-химических моделей в области ВУТ (с использованием различных физико-химических и математических и кинетических моделей исследуются процессы диспергирования угольных шламов, обогащения шламов, горения капель водоугольного топлива)	«Модель»	[46–47]
Изучение характеристик зажигания и режимов горения ВУТ	«Зажигание», «Горение», «Сжигание»	[48–63]
Оценка возможностей использования ВУТ	«Использование»	[64–69]
Исследование реологических и физико-химических свойств ВУТ	«Реология»	[70–77]

Следует отметить, что в большом количестве публикаций, связанных с общими вопросами анализа технологических схем, угольной энергетикой, стратегий развития угольных регионов, в том или ином контексте фигурируют термины ВУТ или ВУС.

В табл. 1 для каждой из категорий представлено ее характеризующее ключевое слово. Далее был выполнен статистический анализ по таблице частот биграмм корпуса, состоящего из заголовков и аннотаций к публикациям. Подсчет выполнялся путем суммирования частот биграмм всех словоформ заданного ключевого слова. Кроме того, учитывались только биграммы релевантные направлению исследований соответствующему ключевому слову (табл. 1). Например, для ключевого слова «использование» в расчет брались только биграммы, которые релевантные тематике ВУТ (ВУС). Таким образом, построена таблица частот (табл. 2)

Таблица 2

Частоты по характеризующим ключевым словам

Характеризующие ключевые слова	Абсолютная частота	TF
«Экология», «Экономика»	99	0,021797
«Транспортирование»	26	0,005724
«Приготовление»	71	0,015631
«Модель»	44	0,009687
«Зажигание», «Горение», «Сжигание»	217	0,047776
«Использование»	63	0,013870
«Реология»	19	0,004183
«Котел», «Котельная»	71	0,015631

Представим частотные данные табл. 2 в виде долевого диаграммы (рис. 5).

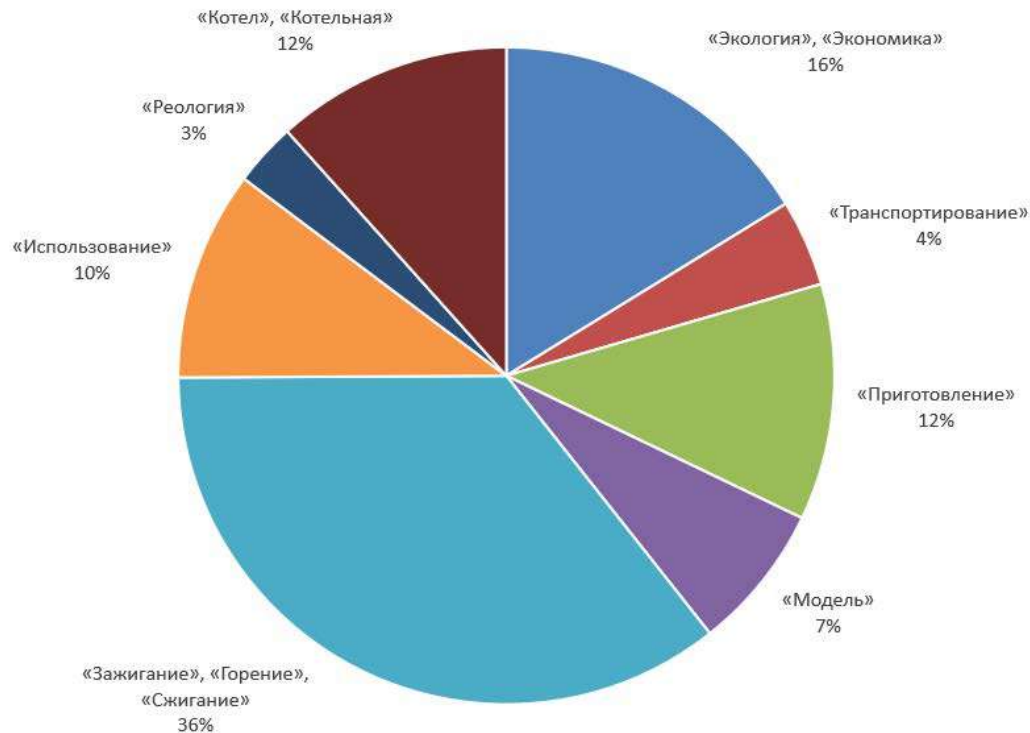


Рис. 5. Долевая диаграмма по характеризующим ключевым словам для направлений исследований по тематике ВУТ

В целом полученные данные коррелируют с эмпирическими данными, полученными при выполнении анализа литературных источников, соответствующих изучаемому корпусу публикаций.

Таким образом, в рамках анализа результатов о наиболее релевантных тематике ВУТ направлениях исследований можно сказать, что лидирующие позиции занимают различные аспекты сжигания ВУТ и ВУС. Кроме того, значительное число публикаций освещает экологическую и экономическую составляющую тематики ВУТ и в целом угольной отрасли.

Для ответа на вопрос В2 определим три укрупненных категории способов утилизации ВУС. В частности, рассмотрим такие способы, как «сжигание» («факельное сжигание»), «сжигание в кипящем слое» и «газификация».

Как источник данных для частотного анализа используется таблица частот, построенная по всему тексту публикаций. В связи с извлечением текстовых данных из формата pdf таблица частоты появлений соответствующих терминов содержит значительное число фрагментов слов, номеров страниц, данных из колонтитулов и т.п. После частичной фильтрации получены данные частот 109 536 слов (фрагментов слов) при общем числе слов в корпусе 740 115. Данные частот по рассматриваемым категориям представлены в табл. 3.

Таблица 3

Данные частот способов сжигания ВУС

Укрупненная категория способов сжигания	Абсолютная частота	TF
Сжигание	245	0,002236708
Сжигание в кипящем слое	98	0,000894683
Газификация	314	0,002866637

Для удобного эмпирического анализа представим частотные данные табл. 3 в виде долевой диаграммы (рис. 6).

Установлено, что лидирующую позицию занимает категория «Газификация». Исследователи выделяют целый ряд методов газификации, к наиболее перспективным относится прямоточная газификация ВУС с сухим шлакообразованием. Такая газификация эффективна при использовании высококалорийных низкокалорийных углей.

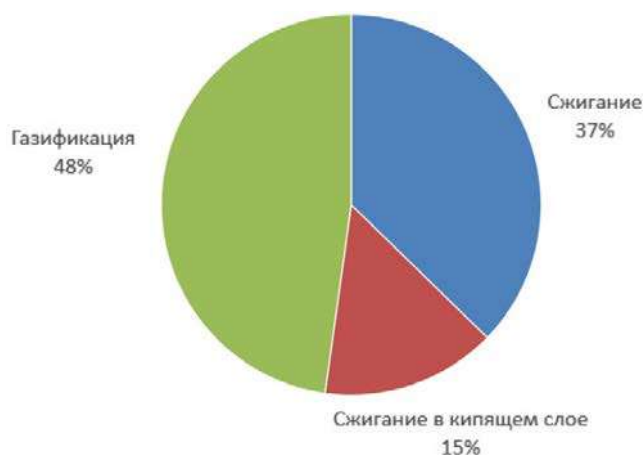


Рис. 6. Результат анализа по способу утилизации ВУС

Различные физико-химические свойства данных категорий углей определяют различные реологические свойства ВУС и ВУТ. В публикациях, связанных с исследованием свойств углей и, соответственно, вопросами приготовления ВУТ из таких углей, характерна географическая или региональная составляющая, которая обусловлена залежами определенных видов углей в конкретном регионе. Например, для Восточной Сибири и Канско-Ачинского бассейна характерно залегание преимущественно углей, относящихся к бурым, в то же время для Донецкого угольного бассейна – наличие антрацитов и каменных углей.

Для исследования ответов на вопрос 3 использовался анализ частот как по ключевым словам, так и по таблице частот биграмм. В частности, рассмотрены такие категории углей, как антрацит, бурый уголь, длиннопламенный уголь, газовый уголь, шлам (табл. 4).

Таблица 4

Данные частот по видам углей

Категория углей	Абсолютная частота	TF
Шлам	308	0,00281186
Антрацит	99	0,00090381
Бурый уголь	231	0,00210889
Длиннопламенный уголь	5	0,00004565

Для удобного эмпирического анализа представим частотные данные табл. 4 в виде долевой диаграммы (рис. 7).

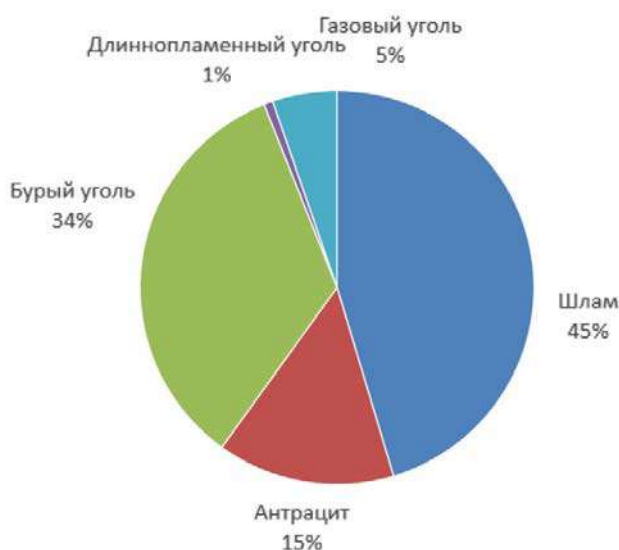


Рис. 7. Результаты анализа по видам углей

Полученные результаты свидетельствуют о значительном числе исследований, направленных на повышение эффективности использования низкокалорийных углей и шламов для приготовления ВУТ. Высокая доля для категории «шлам» обусловлена, прежде всего, задачами утилизации отходов угольной промышленности и экологическим аспектом использования ВУТ. Таким образом, следует, что в работах по тематике ВУТ преобладает изучение бурых углей и шламов.

Далее проведем подобный анализ для оценки релевантности факторов, влияющих на реологические свойства ВУТ. Полученные данные частот для таких факторов, как гранулометрический состав угля, концентрация угля, зольность, выход летучих веществ, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Данные частот по факторам влияния

Категория углей	Абсолютная частота	TF
Гранулометрический состав	161	0,001469836
Концентрация угля	210	0,001917178
Зольность угля	410	0,003743062
Выход летучих веществ	31	0,000100424

Представим частотные данные табл. 5 в виде долевой диаграммы (рис. 8).

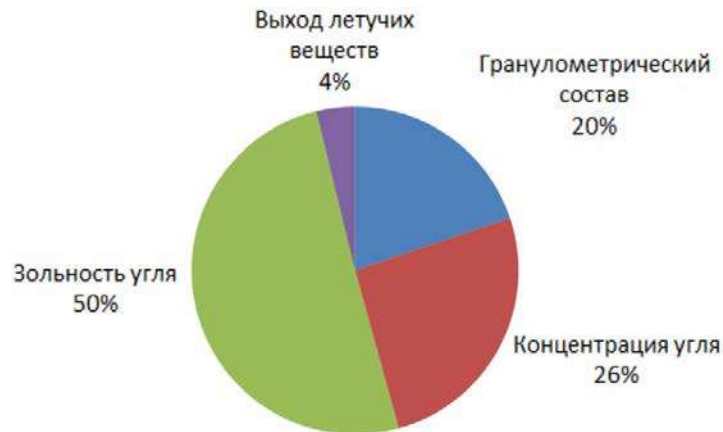


Рис. 8. Анализ релевантности факторов, определяющих реологические свойства

Из диаграммы видно, что в работах по тематике ВУТ зольность угля рассматривается чаще всего (порядка 50 %), высокий показатель для такого фактора, как концентрация угля, может быть обусловлен большим числом работ, в которых изучаются вопросы, связанные с эффективностью сжигания ВУТ. Проведенные исследования дают понимание о наиболее распространенных и изучаемых факторах, влияющих на реологические свойства водоугольного топлива.

Заключение

В работе проведен анализ большого числа публикаций по тематике водоугольного топлива и водоугольных суспензий, как с использованием классических методов анализа литературных источников, так и с использованием современных статистических и семантических методов. В рамках проведенного исследования выявлено, что значительное число работ по тематике ВУТ посвящено изучению вопросов эффективного его сжигания, а также экологическим и экономическим аспектам использования водоугольных сред. Кроме того, полученные статистические данные свидетельствуют о лидирующей позиции газификации как способа утилизации ВУТ (ВУС). В работах исследователей преобладает изучение бурых углей и шламов для приготовления водоугольных суспензий. Кроме того, получены данные о ряде факторов, влияющих на реологические свойства ВУТ.

Практическая ценность работы заключается в получении фактических данных о релевантности публикаций по тематике ВУТ различным ключевым словам. И могут быть использованы как при анализе степени изученности соответствующих направлений приготовления, транспортирования и

использования водоугольного топлива, так и в развитии методологии использования семантических методов для анализа русскоязычных публикаций. Кроме того, разработан ряд программных средств для реализации автоматизации частотного анализа и формирования корпуса публикаций на основании данных динамически формируемых веб-страниц.

Список литературы

1. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal–water suspensions // *Fuel*. 2011. Vol. 90. P. 865–877.
2. Радзюк А. Ю., Истягина Е. Б., Кулагин В. А., Жуйков А. В. Современные проблемы газификации водоугольного топлива (краткий обзор) // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2021. № 14. С. 487–506. doi: 10.17516/1999-494X-0328
3. Мурко В. И., Федяев В. И., Хямяляйнен В. А. Физико-технические основы водоугольного топлива. Кемерово : Кузбассвузиздат, 2009. 195 с.
4. Баранова М. П. Гидравлические режимы трубопровода для транспорта водоугольных суспензий // *Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири : тр. IX Междунар. науч.-практ. конф.* Кемерово, 2012. С. 185–187.
5. Белецкий В. С., Круть А. А., Свитлый Ю. Г. Особенности гидравлической транспортировки водоугольного топлива // *Форум горняков*. 2008. Т. 3. С. 272–278.
6. Белецкий В. С., Круть А. А., Свитлый Ю. Г. Утилизация угольных шламов путем изготовления водоугольного топлива // *Обогащение полезных ископаемых*. 2005. Вып. 24. С. 111–118.
7. Белецкий В. С., Круть А. А., Власов Ю. Ф. Реологические характеристики водоугольных суспензий в зависимости от качества исходного угля // *Вестник Криворожского технического университета*. 2006. Вып. 11. С. 49–55.
8. Делягин Г. Н., Петраков А. П., Ерохин С. Ф. Эковут – новое экологически чистое топливо нового поколения // *Новые технологии сжигания твердого топлива: их текущее состояние и использование в будущем : сб. докл. Всерос. науч.-техн. семинар*. М. : ВТИ, 2001. С. 99–100.
9. Круть А. А., Козыряцкий Л. Н. Водоугольное топливо на основе угольных шламов // *Сб. тр. Донец. нац. техн. ун-та. Сер. горноэлектромеханическая*. 2009. Вып. 17. С. 185–194.
10. Круть А. А. Особенности и пути использования водоугольного топлива на основе антрацитов // *Новое в технологии, технике и переработке минерального сырья*. Кривой Рог, 2006. С. 147–155.
11. Швыров В. В., Короп Г. В., Нечай Т. А., Шишлакова В. Н. Исследование методов и подходов решения задачи SLAM с использованием статистического анализа корпуса англоязычных публикаций // *Вестник Луганского государственного педагогического университета : сб. науч. тр. Сер. 5, Гуманитарные науки. Технические науки*. 2022. № 3. С. 75–89.
12. Капустин Д. А., Швыров В. В., Шулика Т. И. Статический анализ корпуса исходных кодов Python-приложений // *Программная инженерия*. 2022. Т. 13, № 8. С. 394–403. doi: 10.17587/prin.13.394-403
13. Porter M. F. An algorithm for suffix stripping // *Program*. 1980. Vol. 14, № 3. P. 130–137.
14. Jones K. S. A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval // *Journal of Documentation*. 2004. Vol. 60, no. 5. P. 493–502.
15. Baranova M. P., Kulagin V. A. Energy and ecological aspects of coal-water slurry utilization // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2011. № 5. С. 527–532.

References

1. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal–water suspensions. *Fuel*. 2011;90:865–877.
2. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagin V.A., Zhuikov A.V. Modern problems of gasification of water-coal fuel (a brief review). *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of the Siberian Federal University. Technology and technology*. 2021;(14):487–506. (In Russ.). doi: 10.17516/1999-494X-0328
3. Murko V.I., Fedyaev V.I., Khyamyalyaynen V.A. *Fiziko-tekhnicheskie osnovy vodougol'nogo topliva = Physico-technical foundations of coal-water fuel*. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2009:195. (In Russ.)
4. Baranova M.P. Hydraulic modes of pipeline for transportation of coal-water suspensions. *Prirodnye i intelektual'nye resursy Sibiri: tr. IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Natural and intellectual resources of Siberia : tr. IX International scientific and practical conference*. Kemerovo, 2012:185–187. (In Russ.)
5. Beletskiy V.S., Krut' A.A., Svitlyy Yu.G. Features of hydraulic transportation of coal-water fuel. *Forum gornyyakov = Forum of miners*. 2008;3:272–278. (In Russ.)
6. Beletskiy V.S., Krut' A.A., Svitlyy Yu.G. Utilization of coal sludge by manufacturing coal-water fuel. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh = Mineral enrichment*. 2005;(24):111–118. (In Russ.)
7. Beletskiy V.S., Krut' A.A., Vlasov Yu.F. Rheological characteristics of coal-water suspensions depending on the quality of the initial coal. *Vestnik Krivorozhskogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Krivoy Rog Technical University*. 2006;(11):49–55. (In Russ.)
8. Delyagin G.N., Petrakov A.P., Erokhin S.F. Ekovut – a new environmentally friendly fuel of a new generation. *Novye tekhnologii szhiganiya tverdogo topliva: ikh tekushchee sostoyanie i ispol'zovanie v budushchem: sb. dokl.*

- Vseros. nauch.-tekhn. Seminar = New technologies of solid fuel combustion: their current state and use in the future : collection of dokl. All-Russian scientific and technical seminar. Moscow: VTI, 2001:99–100. (In Russ.)*
9. Krut' A.A., Kozyryatskiy L.N. Coal-water fuel based on coal sludge. *Sb. tr. Donets. nats. tekhn. un-ta. Ser. Gornoelektromekhanicheskaya = Proceedings of the Donets National Technical University. Univ. Ser. mining and electro-mechanical.* 2009;(17):185–194. (In Russ.)
 10. Krut' A.A. Features and ways of using coal-water fuel based on anthracites. *Novoe v tekhnologii, tekhnike i pererabotke mineral'nogo syr'ya = New in technology, engineering and processing of mineral raw materials.* Krivoy Rog, 2006:147–155. (In Russ.)
 11. Shvyrov V.V., Korop G.V., Nechay T.A., Shishlakova V.N. Research of methods and approaches for solving the SLAM problem using statistical analysis of the corpus of English-language publications. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta: sb. nauch. tr. Ser. 5, Gumanitarnye nauki. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Lugansk State Pedagogical University : collection of scientific tr. Ser. 5, Humanities. Technical sciences.* 2022;(3):75–89. (In Russ.)
 12. Kapustin D.A., Shvyrov V.V., Shulika T.I. Static analysis of the Python application source code corpus. *Programnaya inzheneriya = Software Engineering.* 2022;13(8):394–403. (In Russ.). doi: 10.17587/prin.13.394-403
 13. Porter M.F. An algorithm for suffix stripping. *Program.* 1980;14(3):130–137.
 14. Jones K.S. A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval. *Journal of Documentation.* 2004;60(5):493–502.
 15. Baranova M.P., Kulagin V.A. Energy and ecological aspects of coal-water slurry utilization. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology.* 2011;(5):527–532.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Робертович Роганов

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

Vladimir R. Roganov

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

Вячеслав Владимирович Швыров

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

Vyacheslav V. Shvyrov

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor of the sub-department
of information and educational 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 18.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 21.10.2023

Принята к публикации/Accepted 20.11.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ ЦИФРОВЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И. В. Пешков¹, В. А. Жигулин², Н. А. Фортунова³

^{1,2,3} Елецкий государственный университет имени И. А. Бунина, Елец, Липецкая обл., Россия
¹ ilvpeshkov@gmail.com, ² obi4n@yandex.ru, ³ fortunova.nata@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* 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. *Материалы и методы.* Проведен анализ алгоритмов оценки угловых координат источников радиоизлучения со сверхразрешением в составе антенных решеток, состоящих из микрополосковых антенных элементов, с учетом их искаженных диаграмм направленности и фактических матриц рассеяния при действии взаимного влияния антенных элементов в диапазоне УКВ. *Результаты.* Описаны принципы работы радиопеленгатора на основе цифровых алгоритмов оценки угловых координат. Рассмотрен эффект взаимного влияния элементов антенной решетки, дана оценка его влияния на результаты пеленгации. Разработан ряд моделей алгоритмов оценки угловых координат для различных видов антенных решеток, проведено их сравнение. Лучший результат показывает метод MUSIC: разница в разрешающей способности по сравнению с другими алгоритмами составила порядка 10 дБ при использовании микрополосковых антенных элементов. Также были разработаны модели антенных решеток с разными видами элементов. Наилучшие результаты показали линейные решетки с элементами – полосковыми антеннами с воздушным диэлектриком. Разница в значениях отклонений и минимально различимых углах составила 1–2 дБ и 8–12° соответственно. *Выводы.* По результатам экспериментов было проведено сравнение нескольких антенных решеток с разными видами антенных элементов. Установлено, что наилучшей конфигурацией является использование метода MUSIC после обработки сигналов с выходов полосковых антенн с воздушным диэлектриком. Полученные данные планируется использовать в дальнейшем исследовании для установления наиболее выгодной конфигурации АР с цифровой пространственной фильтрацией для дальней тропосферной связи.

Ключевые слова: цифровые алгоритмы пеленгации, взаимное влияние антенных элементов, антенные решетки, алгоритм Барлетта, алгоритм Кейпона, алгоритм MUSIC, псевдоспектр

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

Для цитирования: Пешков И. В., Жигулин В. А., Фортунова Н. А. Моделирование процесса радиопеленгации цифровыми антенными решетками с учетом эффекта взаимного влияния антенных элементов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 40–52. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-4

MODELING OF THE RADIO DIRECTION FINDING PROCESS BY DIGITAL ANTENNA ARRAYS TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF MUTUAL COUPLING OF ANTENNA ELEMENTS

I.V. Peshkov¹, V.A. Zhigulin², N.A. Fortunova³

^{1,2,3} Bunin Yelets State University, Yelets, Lipetsk region, Russia
¹ ilvpeshkov@gmail.com, ² obi4n@yandex.ru, ³ fortunova.nata@mail.ru

Abstract. *Background.* The effect of mutual coupling of antenna elements can have a significant impact on the characteristics of complex, sensitive systems. This effect changes the shape of the directional patterns of antenna elements, changes their active resistance, which complicates the matching of the antenna arrays' impedances. In areas with

strict requirements, mutual coupling can have a very significant impact on the results of the system. In particular, they are able to influence the results of digital algorithms for estimating the angular coordinates of radio sources with super-resolution. The purpose of this work: to develop a digital model and to simulate the operation of the digital direction finding algorithm. The model should take into account the factor of mutual coupling between the antenna elements. *Materials and methods.* The work of algorithms for estimating the angular coordinates of radio sources with super-resolution as part of antenna arrays consisting of microstrip antenna elements has been studied, taking into account their distorted radiation patterns, as well as the actual scattering matrices of antenna arrays under the action of mutual coupling in the VHF range. *Results.* The principles of operation of the radio direction finder based on digital algorithms for estimating angular coordinates are described. The effect of mutual coupling of the elements of the antenna array is considered, and its influence on the direction finding results is estimated. A number of models of algorithms for estimating angular coordinates for various types of antenna arrays have been developed, and their comparison has been carried out. The best result is shown by the MUSIC method: the difference in resolution compared to other algorithms was about 10 dB when using microstrip antenna elements. Models of antenna arrays with different types of elements were also developed. The best results were shown by linear arrays with elements – strip antennas with an air dielectric. The difference in the values of deviations and minimally distinguishable angles was 1-2 dB and 8-12 °, respectively. *Conclusions.* According to the results of the experiments, several antenna arrays with different types of antenna elements were compared. It is established that the best configuration is to use the MUSIC method after processing signals from the outputs of strip antennas with an air dielectric. The obtained data is planned to be used in the future in a full-scale experiment. The obtained real graphs of the dependence of the received signal power on the angle are planned to be compared with the simulation results presented in this article.

Keywords: direction-of-arrival estimation, mutual coupling, antenna arrays, Bartlett algorithm, Capon algorithm, MUSIC, pseudospectrum

Financing: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-21-00125, <https://rscf.ru/project/23-21-00125>

For citation: Peshkov I.V., Zhigulin V.A., Fortunova N.A. Modeling of the radio direction finding process by digital antenna arrays taking into account the effect of mutual coupling of antenna elements. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):40–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-4

Введение

Большая часть работ в области изучения цифровых антенных решеток выполнена с использованием классической теории. Фундаментальным для этого подхода является предположение, что взаимное влияние (ВВ) между антенными элементами (АЭ) пренебрежимо мало. Во многих случаях это предположение оправдано. С другой стороны, в соответствии со строгими требованиями в определенных областях проектирование высокочувствительных антенн, например, для спутниковой связи, дистанционного зондирования, радиоастрономии, медицинской техники, должно осуществляться с учетом ВВ [1].

Основными причинами возникновения ВВ являются недостаточная изоляция, снижение эффективности антенны, уменьшение коэффициента усиления антенны, высокая корреляция между излучателями [2]. Изучению эффекта взаимного влияния посвящен ряд работ [3–5]. Рассмотрим воздействие данного эффекта на фазированные антенные решетки [6]. Эффекты взаимного влияния, будь то положительные или отрицательные, могут оказать существенное влияние на характеристики системы. ВВ может быть выражено приблизительно с использованием аналитических формулировок или строго с использованием численного моделирования. Второй способ предпочтительнее для решеток с небольшим числом элементов (от десятков до сотен), где аппроксимации бесконечной антенной решетки с использованием элементарных ячеек недостаточно точны.

Цель данного исследования: разработка модели и моделирование радиопеленгатора, основанного на цифровых алгоритмах оценки угловых координат, с учетом фактора ВВ антенных элементов.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- моделирование антенных решеток с разными видами антенных элементов;
- моделирование алгоритмов для антенных решеток с разными видами антенных элементов: диполями и полосковыми антеннами;
- моделирование алгоритмов с учетом матриц рассеяния и искаженных диаграмм направленности элементов.

Принцип работы цифровых алгоритмов пеленгации

Существует большое количество алгоритмов оценки угловых координат радиосигналов для цифровых антенных решеток. Они применяются для определения мощности сигнала на выходе АР в зависимости от угла прихода сигнала. По максимумам этой функции, называемой псевдоспектром,

можно оценить, с какого направления поступает радиосигнал. Достаточно широко известны алгоритмы Барлетта, Кейпона, MUSIC и др.

Описание модели радиопеленгатора и цифровой антенной решетки

На рис. 1 представлена обобщенная схема процесса радиопеленгации цифровой антенной решетки. Ее можно разделить на две части: аналоговую и цифровую. В аналоговой части происходит прием сигналов антенной решеткой. В цифровой части происходит расчет сначала корреляционной матрицы, а затем и псевдоспектра.

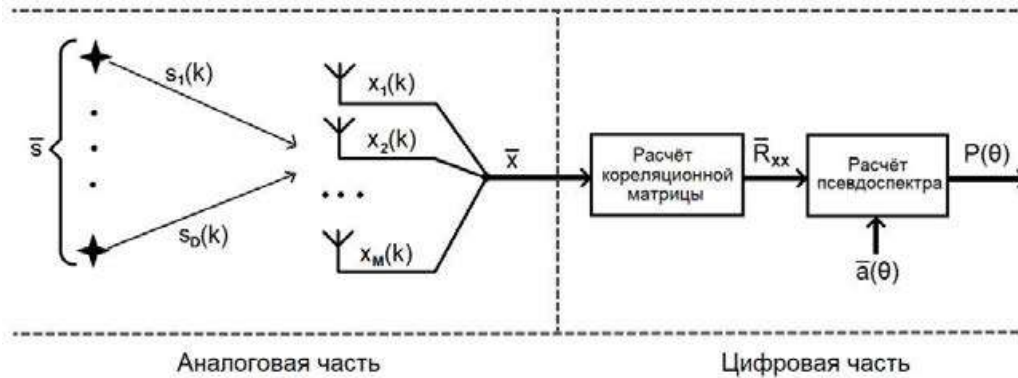


Рис. 1. Общая схема системы цифрового радиопеленгатора

Рассмотрим модель работы алгоритмов пеленгации в соответствии с данной схемой. Пусть имеется линейная антенная решетка, состоящая из M антенных элементов. Она принимает D независимых сигналов из D разных направлений с углами θ_D , как показано на рис. 1. Здесь $S_D(k)$ – падающий сигнал; $x_M(k)$ – принятый сигнал с M -го антенного элемента; $y(k)$ – итоговый выходной сигнал. В итоге формула для матрицы выходного сигнала решетки имеет следующий вид:

$$\bar{x} = \bar{A} \cdot \bar{s} + \bar{n}, \tag{1}$$

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

$$\bar{A} = [\bar{q}(\theta_1) \quad \bar{q}(\theta_2) \quad \dots \quad \bar{q}(\theta_D)], \tag{2}$$

где $\bar{q}(\theta_D)$ – это сканирующий вектор из M элементов для направления θ :

$$\bar{q}(\theta) = [1 \quad e^{j\pi \sin \theta} \quad \dots \quad e^{j(M-1)\pi \sin \theta}]. \tag{3}$$

Здесь представлена формула для линейной решетки. Учитывается сдвиг фаз в антенных элементах, вызванный их расположением (с расстоянием между элементами в $0,5\lambda$).

Корреляционная матрица определяется по следующей формуле:

$$\bar{R}_{xx} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_1(k) \cdot x_1(k)^* & \dots & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_1(k) \cdot x_M(k)^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_M(k) \cdot x_1(k)^* & \dots & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_M(k) \cdot x_M(k)^* \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где N – число отсчетов цифрового сигнала; $x_M(k)^*$ – эрмитово-сопряженная матрица.

Далее на основе корреляционной матрицы рассчитывается псевдоспектр. Ниже представлены формулы для методов Барлетта [7], Кейпона [8, 9] и MUSIC [10] соответственно:

$$P_B(\theta) = \bar{a}(\theta)^H \bar{R}_{xx} \bar{a}(\theta), \tag{5}$$

$$P_C(\theta) = \frac{1}{\bar{a}(\theta)^H \bar{R}_{xx}^{-1} \bar{a}(\theta)}, \quad (6)$$

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\left| \bar{a}^H(\theta) \bar{E}_N \bar{E}_N^H \bar{a}(\theta) \right|}, \quad (7)$$

где $\bar{a}(\theta)$ – матрица сканирующих векторов для всего диапазона пеленгации; \bar{E}_N – собственный вектор шумов. Выражение (5) соответствует методу Барлетта, формула (6) – методу Кейпона. Метод MUSIC (7) несколько отличается от представленных выражений. В его формуле используется не корреляционная матрица (4), а вычисляемый на ее основе собственный вектор шумов \bar{E}_N . Подробнее математические преобразования рассмотрены в работах [11, 12 с. 169–202].

Взаимное влияние и метод встроенных элементов (*embedded elements*)

В антенных решетках диаграммы направленности (ДН) всех антенных элементов не идентичны. На рис. 2,а представлен пример ДН изолированного элемента. Однако взаимное влияние искажает ДН отдельных элементов (рис. 2,б). Как следствие, общая ДН решетки больше не является просто произведением коэффициента решетки и ДН изолированного элемента.

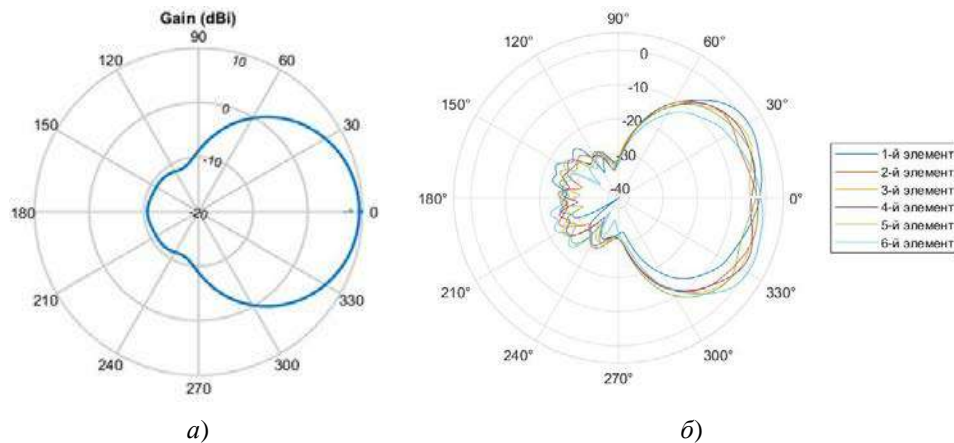


Рис. 2. Диаграммы направленности полосковой антенны:
 а – изолированного антенного элемента; б – с учетом взаимного влияния

Для проведения более приближенных к реальности расчетов требуется вычисление ДН для каждого отдельного элемента антенной решетки. Диаграмма направленности отдельного элемента с учетом взаимного влияния представляет собой ДН антенной решетки, в которой исследуемый элемент считается активным, а все остальные элементы являются пассивными с отключенными выходами. Такой подход принято называть вычислением по методу встроенного элемента (*embedded element*). Ключевым моментом является то, что вычисленная таким образом ДН отдельно АЭ – это диаграмма направленности, учитывающая всю антенную решетку, включая рассеяние вблизи активного элемента.

Учет взаимного влияния в модели цифровой антенной решетки

В представленных выше формулах (1)–(7) учитывается сдвиг фаз в антенных элементах, вызванный формой антенной решетки. Однако при этом не учитывается взаимное влияние этих элементов. В связи с этим было решено скорректировать модели работы алгоритмов таким образом, чтобы в них учитывался фактор взаимного влияния АЭ, а именно диаграммы направленности каждого элемента. Для этого была дополнена формула для нахождения матрицы сканирующих векторов:

$$\bar{A}_{\text{ДН}} = [\bar{q}_{\text{ДН}}(\theta_1) \bar{q}_{\text{ДН}}(\theta_2) \dots \bar{q}_{\text{ДН}}(\theta_D)], \quad (8)$$

$$\bar{q}_{\text{ДН}}(\theta) = [f_1(\theta) \quad f_2(\theta) \cdot e^{j\pi \sin \theta} \dots f_M(\theta) \cdot e^{j(M-1)\pi \sin \theta}], \quad (9)$$

где $f_M(\theta)$ – это значение диаграммы направленности M -го антенного элемента в направлении угла θ .

Моделирование антенных решеток

Моделирование проводилось в цифровом виде. На первом этапе рассчитывается матрица случайных падающих сигналов заданной мощности. Далее на основе заранее рассчитанных антенных элементов инициализируется модель антенной решетки и вычисляются диаграммы направленности. На завершающем этапе согласно вышеуказанным формулам происходит вычисление матрицы принятых сигналов, а затем корреляционной матрицы и псевдоспектра. И, наконец, исходя из параметров выходного сигнала, рассчитывается корреляционная матрица.

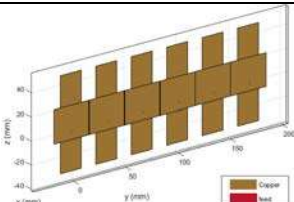
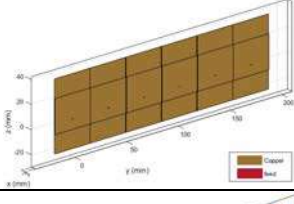
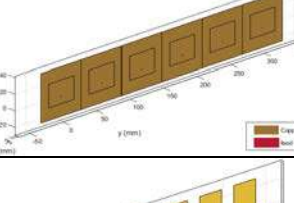
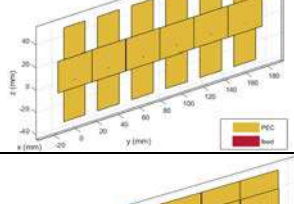
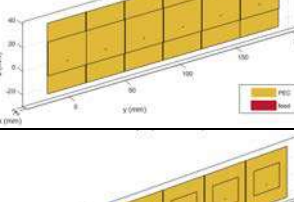
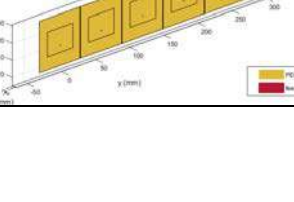
Для расчета диаграмм направленности было проведено моделирование антенных решеток согласно методу моментов по методу встроенного элемента (рис. 2,б). После расчета каждого типа антенны выполнялась оптимизация для того, чтобы максимизировать коэффициент усиления (КУ) и минимизировать параметр S_{11} при импедансе равном 50 Ом. Моделирование проводилось согласно следующим параметрам:

- количество элементов решетки $M = 6$;
- частота принимаемого сигнала – 5 ГГц.

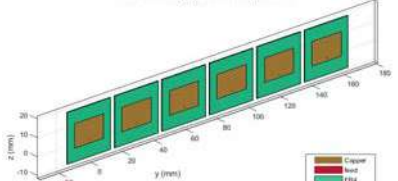
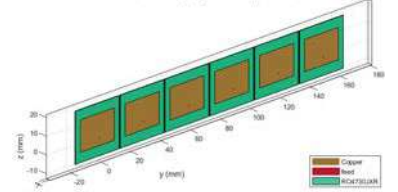
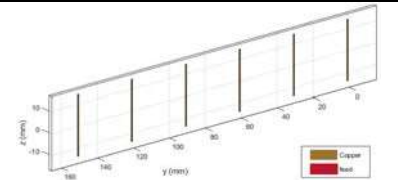
Ниже представлены полученные модели и их характеристики (табл. 1).

Таблица 1

Параметры моделей антенных решеток

Номер модели	Внешний вид	Описание	Материал антенн	Материал диэлектрика
1	2	3	4	5
1		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 8,38 дБ, $S_{11} = -26$ дБ на $f = 5$ ГГц	Медь	Воздух
2		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 8,56 дБ, $S_{11} = -21$ дБ на $f = 5$ ГГц	Медь	Воздух
3		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 9,48 дБ, $S_{11} = -28$ дБ на $f = 5$ ГГц	Медь	Воздух
4		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 8,7 дБ, $S_{11} = -22$ дБ на $f = 5$ ГГц	Идеальный проводник	Воздух
5		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 9 дБ, $S_{11} = -21$ дБ на $f = 5$ ГГц	Идеальный проводник	Воздух
6		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 10 дБ, $S_{11} = -21$ дБ на $f = 5$ ГГц	Идеальный проводник	Воздух

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
7		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 1,8 дБ, $S_{11} = -11$ дБ на $f = 5$ ГГц	Медь	FR4
8		ЛАР, элементы – прямоугольные полосковые антенны, элементы оптимизированы, КУ = 4,8 дБ, $S_{11} = -17$ дБ на $f = 5$ ГГц	Медь	RO4730JXR
9		ЛАР, элементы – диполи, элементы оптимизированы на $f = 5$ ГГц	Медь	–

Сравнение методов Барлетта, Кейпона и MUSIC

После задания моделей антенных решеток было проведено сравнение трех алгоритмов пеленгации – Барлетта, Кейпона и MUSIC. Для этого были приняты следующие условия:

- пеленгация осуществляется по азимуту в пределах от -90° до 90° ;
- на антенную решетку поступает два несвязанных между собой сигнала с углами места 0° и азимутами $+20^\circ$ и -20° соответственно;
- значение ОСШ для обоих сигналов равно 10 дБ.

При проведении расчетов были использованы две антенные решетки с разными типами элементов: решетка 2 с элементами – полосковыми антеннами и решетка 9 с элементами – диполями (см. табл. 1). Исследование выполнялось только при искаженных ДН элементов. При этом считалось, что каналы ЦАР согласованы по фазе и амплитуде.

После проведения всех расчетов были получены графики зависимости мощности сигнала на выходе антенной решетки от угла азимута. Данные графики представлены на рис. 3.

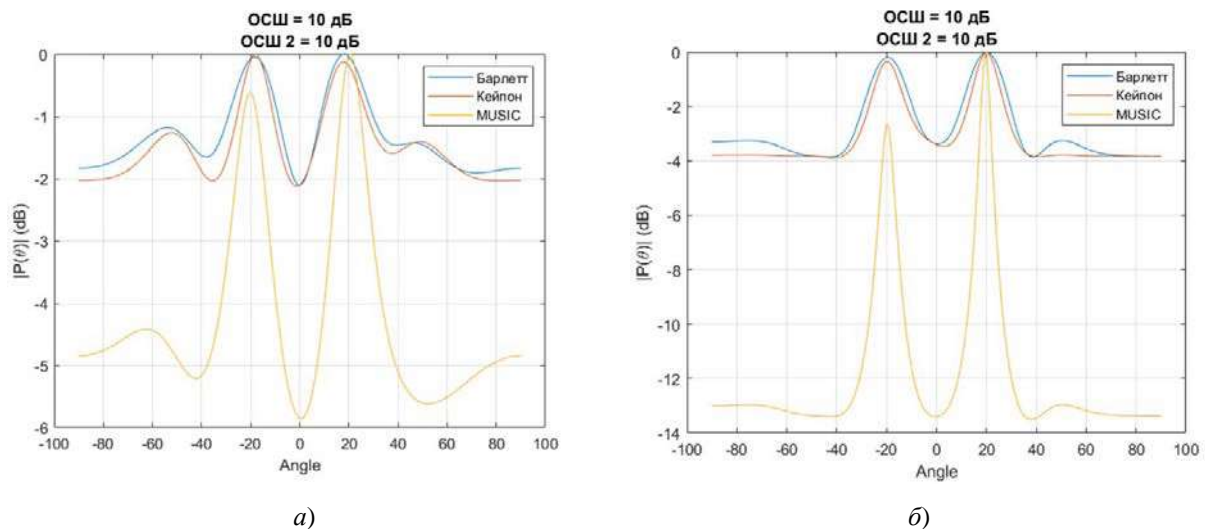


Рис. 3. Графики псевдоспектров:
 а – элементы – диполи; б – элементы – полосковые антенны

Рассмотрим полученные данные. Каждому из двух поступающих сигналов на графиках соответствуют два максимума с мощностью 0 дБ. На обоих рисунках четко прослеживается разница в

разрешающей способности разных методов. Лучший результат показывает метод MUSIC. Методы Барлетта и Кейпона похожи, однако пики на графиках по методу Кейпона более острые, что позволяет точнее определить направление на источник сигнала.

Кроме того, из графиков следует, что антенная решетка с элементами – полосковыми антеннами показывает лучшую разрешающую способность, чем решетка с элементами – диполями. Глубина «впадины» между пиками на графике рис. 3,б в 2–1,5 раза больше, чем на графике рис. 3,а, причем для всех трех методов.

Влияние матрицы рассеяния. Моделирование с учетом разных факторов

Кроме изменений в диаграммах направленности, взаимное влияние элементов антенной решетки также можно выразить в матрицах рассеяния S [13]. Различные типы СВЧ-устройств можно описать с помощью падающих и отраженных волн, которые распространяются в подключенных к ним линиях (портах). Связь между этими волнами описывается волновой матрицей рассеяния или матрицей S -параметров. Например, для шестиэлементной антенной решетки матрица взаимного влияния будет представлять собой массив размерностью 6×6 :

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix}, \tag{10}$$

где S_{11} представляет собой коэффициент отражения для порта (элемента) 1, S_{12} представляет коэффициент передачи от элемента 2 на элемент 1 и т.д. В общем, S_{NM} представляет собой коэффициент передачи от порта M к порту N в многопортовой сети.

Было принято решение провести сравнительное исследование того, какое влияние окажет учет в модели матрицы рассеяния (амплитудное и фазовое рассогласование каналов ЦАР) исследуемых антенных решеток и искаженных диаграмм направленности АЭ на итоговый пространственный спектр. Была осуществлена сравнительная оценка результатов моделирования для разных антенных решеток, представленных в табл. 1. Были приняты следующие начальные условия:

- пеленгация осуществляется по азимуту в пределах от 0° до 180° , при значении угла места равном 90° ;
- на антенную решетку поступает два независимых между собой сигнала с координатами по углу места, равными 90° и азимутами – 80° и 100° соответственно;
- алгоритм пеленгации со сверхразрешением – MUSIC.

На первом этапе было проведено моделирование без учета взаимного влияния антенных элементов, т.е. учитываются только идеальные диаграммы направленности отдельного элемента без учета искажений, вносимых взаимным влиянием, а также отсутствует амплитудно-фазовое рассогласование. На рис. 4 представлены результаты моделирования.

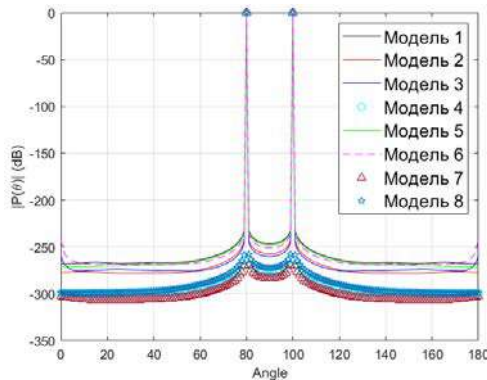


Рис. 4. Результаты моделирования без учета взаимного влияния антенных элементов

Далее было последовательно проведено три моделирования: с учетом только диаграмм направленности, с учетом только матрицы рассеяния и с учетом их обоих. Сделано это было с целью определить, что вносит больший вклад в искажение пространственного псевдоспектра. Результаты представлены на рис. 5–7.

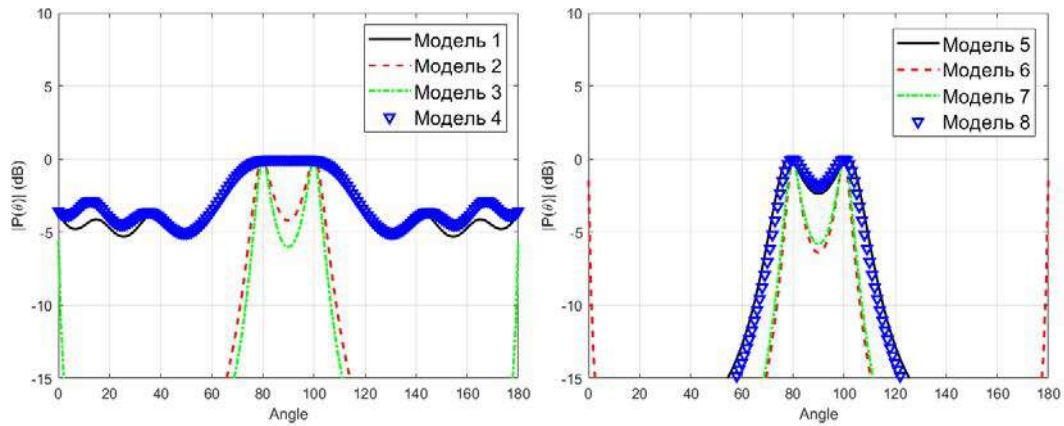


Рис. 5. Результаты моделирования с учетом только диаграмм направленности

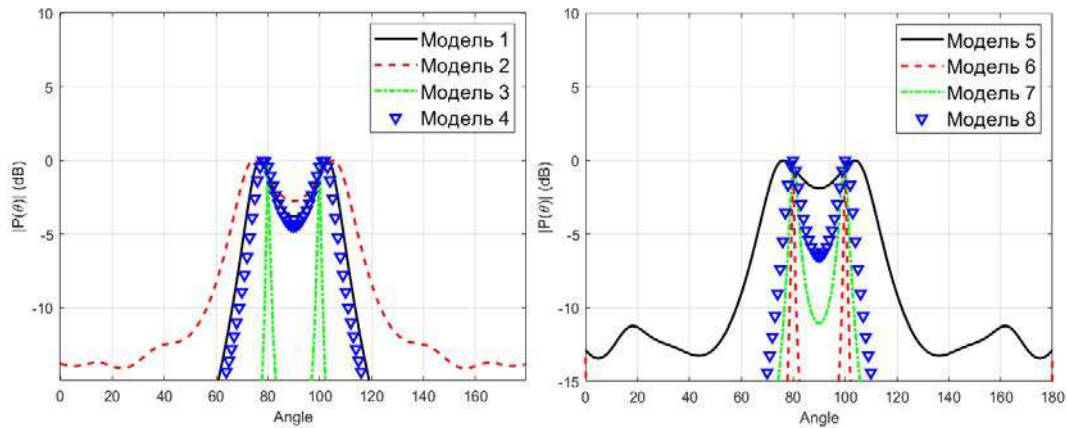


Рис. 6. Результаты моделирования с учетом только матрицы рассеяния

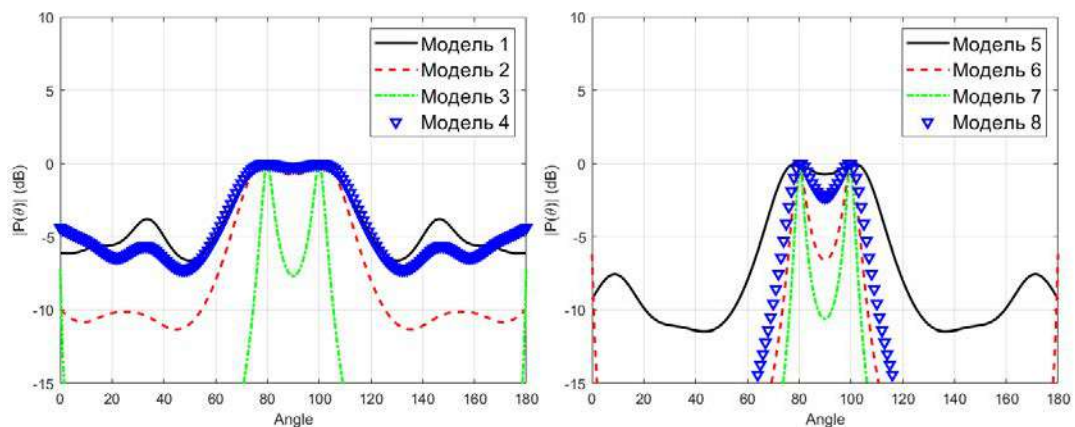


Рис. 7. Результаты моделирования с учетом и диаграмм направленности, и матрицы рассеяния

Рассмотрим полученные графики. Во-первых, учет взаимного влияния продемонстрировал многократное падение разрешающей способности алгоритма. Во-вторых, наибольший вклад в искажения вносит фактор диаграмм направленности. Однако учет матрицы рассеяния показал частичную компенсацию искажения.

Зависимость отклонений от ОСШ

На представленных выше рисунках можно увидеть, что максимумы графиков не совсем совпадают с заданными углами прихода сигналов. На рис. 8 изображены графики для одной и той же антенной решетки при трех разных значениях ОСШ. При повышении мощности полезного сигнала отклонения уменьшаются.

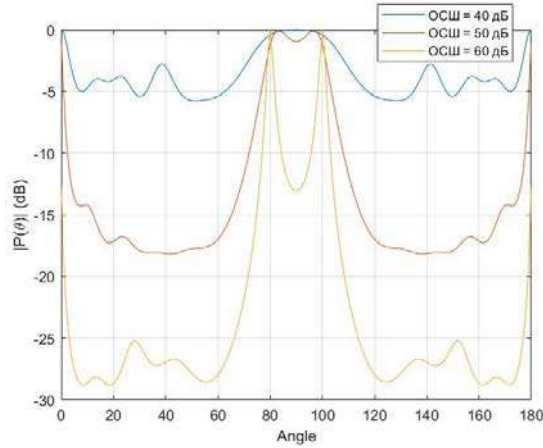


Рис. 8. Отклонения при разных значениях ОСШ

В связи с этим было решено провести сравнительное исследование величины отклонений в результатах пеленгации в зависимости от значения ОСШ. Были приняты следующие условия:

- сканирование осуществляется в азимутальной плоскости в пределах от -90° до 90° ;
- на антенную решетку поступает два независимых между собой сигнала с координатами по углу места, равному 0° и азимуту $+20^\circ$ и -20° соответственно;
- в качестве алгоритма пеленгации используется MUSIC.

Для оценки искажений принят следующий подход: мощность падающих сигналов постепенно уменьшается. После каждого шага уменьшения с помощью функции поиска максимумов проводится определение координат пиков пространственного псевдоспектра. Полученные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Отклонения в пеленгации

Номер модели антенны	Мощность, при которой появляются отклонения	Углы прихода с отклонениями	
		-20°	$+20^\circ$
1	4 дБ	$-18 (+2^\circ)$	$19 (-1^\circ)$
2	4 дБ	$-22 (-2^\circ)$	$24 (+4^\circ)$
3	40 дБ	$-20 (+0^\circ)$	$21 (+1^\circ)$
4	4 дБ	$-19 (+1^\circ)$	$24 (+4^\circ)$
5	4 дБ	$-15 (+2^\circ)$	$25 (+5^\circ)$
6	40 дБ	$-21 (-1^\circ)$	$14 (-6^\circ)$
7	5 дБ	$-11 (+9^\circ)$	$12 (-8^\circ)$
	20 дБ	$-20 (+0^\circ)$	$21 (+1^\circ)$
8	5 дБ	$-13 (+7^\circ)$	$12 (-8^\circ)$
	10 дБ	$-17 (+3^\circ)$	$15 (-5^\circ)$

Как видно, отклонения появляются при определенных значениях ОСШ, и они различны для каждого вида антенных элементов. Наименьшая мощность появления отклонений получена у антенных решеток под номерами 1, 2, 4 и 5. Все эти решетки имеют в качестве диэлектрика воздух и отличаются между собой формой элементов. Более низкие результаты показали антенны с твердыми диэлектриками – номера 7 и 8, у них наименьшие коэффициенты усиления. Самый низкий результат продемонстрировали решетки 3 и 6, где АЭ расположены плотно друг к другу и, следовательно, имеют наибольшее взаимное влияние. Они имеют одинаковую форму антенных элементов и отличаются только материалом изготовления.

Определение минимального угла между источниками (разрешающая способность)

Следующим шагом работы стало определение минимально различимого угла между источниками сигнала, т.е. разрешающая способность. На рис. 9 показан пример двух пространственных спектров для двух вариантов расположения источников сигналов.

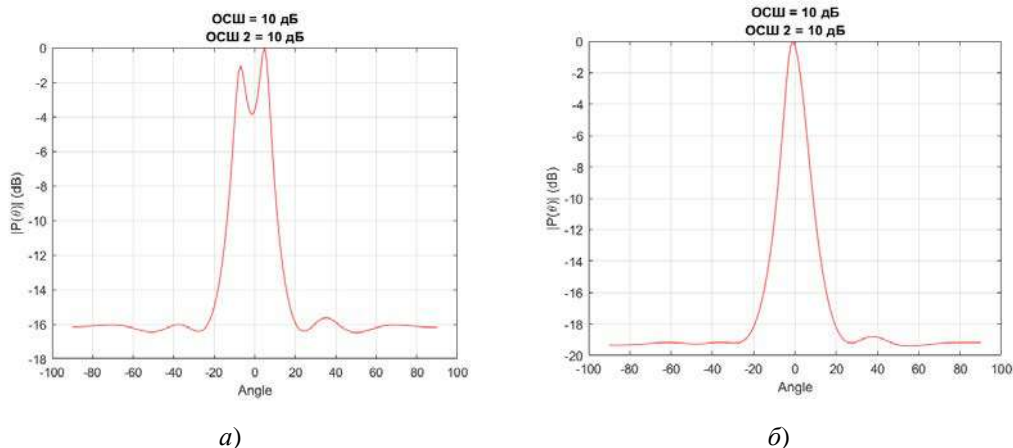


Рис. 9. Определение минимального угла между источниками сигнала.
График псевдоспектра при значении углов падения: *a* – $\pm 7^\circ$; *б* – $\pm 6^\circ$

Как видно из рис. 9, при уменьшении угла между источниками сигнала начинает уменьшаться различимость пиков на графике пространственного псевдоспектра. Они начинают своего рода сливаться в один пик, и при определенном значении угла становятся совсем неразличимы.

Были приняты следующие условия моделирования:

- пеленгация осуществляется по азимуту в пределах от -90° до 90° ;
- мощность сигналов постоянна;
- в качестве алгоритма радиопеленгации используется MUSIC.

Для оценки минимально различимых пространственных координат сигналов использовался следующий подход: на каждую АР подается два сигнала с азимутальными координатами $+20^\circ$ и -20° (угол между источниками сигнала 40°). Постепенно угол между источниками уменьшается. После каждого уменьшения с помощью функции поиска максимумов проводится оценка координат пиков псевдоспектра. Значение ОСШ для всех антенных решеток одинаково.

Таблица 3

Определение минимально различимых углов

Номер АР	Значение ОСШ	Минимально различимые углы между сигналами
1	10 дБ	$\pm 6^\circ$ (12°) есть отклонение
2	10 дБ	$\pm 6^\circ$ (12°) есть отклонение
4	10 дБ	$\pm 7^\circ$ (14°)
5	10 дБ	$\pm 5^\circ$ (10°) есть сильное отклонение
7	10 дБ	$\pm 19^\circ$ (38°)
8	10 дБ	$\pm 10^\circ$ (20°)

Как видно, значения минимальных углов между источниками сигналов близки для антенн с воздушным диэлектриком. Эти же антенны показали лучший результат по наименьшему значению угла. Также при проведении измерений выяснилось, что при уменьшении угла усиливаются отклонения при поиске максимумов псевдоспектра.

Результаты и обсуждение

По результатам проведенных экспериментов было проведено сравнение нескольких антенных решеток с различными видами антенных элементов. Наилучшие результаты в значениях отклонений и минимально различимых углах показали линейные антенные решетки с элементами – полосковыми антеннами с воздушным диэлектриком (№ 1, 2, 4 и 5; табл. 1). Разница в значениях составила 1–2 дБ

и 8–12° соответственно. Данный вид АЭ обладает самыми высокими значениями коэффициента усиления, а также меньшими габаритами. Данная особенность позволяет расположить излучатели таким образом, что взаимное влияние минимально в сравнении с АЭ, у которых в качестве диэлектрика используется материал FR-4 и RO4730JXR. Полученные данные планируется использовать в дальнейшем исследовании для установления наиболее выгодной конфигурации АР с цифровой пространственной фильтрацией для дальней тропосферной связи.

Заключение

В данной работе было проведено исследование и моделирование алгоритмов оценки угловых координат радиосигналов цифровыми антенными решетками на основе электродинамических моделей элементов, таких как микрополосковые антенны, а также полуволновые диполи на частоте 5 ГГц. Были изучены принципы работы алгоритмов пеленгации, рассмотрены формулы для нахождения псевдоспектра по методам Барлетта, Кейпона и MUSIC.

В работе был описан эффект взаимного влияния между элементами цифровой антенной решетки на частоте 5 ГГц. Он заключается в изменении диаграммы направленности, а также элементов матрицы рассеяния АЭ в составе решетки под действием других ее элементов. Для более приближенного к реальности моделирования цифровой радиопеленгации необходимо, чтобы в них учитывались особенности реальных антенных решеток, а именно взаимное влияние антенных элементов. Расчет данного эффекта осуществлялся согласно методу моментов, а также методу встроенного элемента (embedded element). В таком случае ДН каждого АЭ рассчитывается при его возбуждении, при этом остальные элементы запитаны на заданный импеданс.

В работе были представлены результаты проведения ряда численных экспериментов с полученными моделями АР и алгоритмами оценки угловых координат. Было проведено сравнение методов Барлетта, Кейпона и MUSIC для двух антенных решеток с разными видами антенных элементов: диполями и полосковыми антеннами. Эксперимент продемонстрировал разницу в разрешающей способности алгоритмов. Лучший результат показывает метод MUSIC, далее идут методы Кейпона и Барлетта.

Был проведен эксперимент с целью определить, какое влияние на итоговый график псевдоспектра окажет учет в модели матрицы рассеяния и диаграмм направленности. Для этого было проведено четыре моделирования: без учета взаимного влияния, с учетом диаграмм направленности, с учетом матриц рассеяния, с учетом и диаграмм направленности, и матриц рассеяния.

Также были проведены эксперименты по оценке зависимости отклонений на графиках псевдоспектров от значений ОСШ и по определению минимального различимого угла между источниками сигнала. Для данных опытов были разработаны несколько линейных антенных решеток с разными видами антенных элементов.

Установлено, что предпочтительным способом является использование метода MUSIC после обработки сигналов с выходов полосковых антенн с воздушным диэлектриком [14–17].

Список литературы

1. Warnick K. F., Maaskant R., Ivashina M. V. [et al.]. *Phased Arrays for Radio Astronomy, Remote Sensing, and Satellite Communications*. Cambridge : Cambridge University Press, 2018. 470 с.
2. Kumar A., Ansari A. Q., Kanauji B. K. [et al.]. A Review on Different Techniques of Mutual Coupling Reduction Between Elements of Any MIMO Antenna. Part 1: DGSs and Parasitic Structures // *Radio Science*. 2021. № 56. P. 1–25.
3. Паршин Ю. Н., Гусев С. И., Фролов И. И. [и др.]. Влияние взаимных импедансов элементов антенной решетки на эффективность пространственной обработки сигналов // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2017. № 60. С. 17–26.
4. Иншаков Ю. М., Осадченко А. Ю. Виртуальная адаптивная антенная решетка с учетом взаимного влияния ее элементов на основе LMS-алгоритма // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2015. № 6. С. 34–40.
5. Паршин Ю. Н., Комиссаров А. В. Пропускная способность ММО телекоммуникационной системы в условиях изменяющейся пространственной структуры радиотракта с искусственной многолучевостью // *Цифровая обработка сигналов*. 2012. № 1. С. 50–55.
6. Davidson D. B., Warnick K. F. *Contemporary Array Analysis Using Embedded Element Patterns* // *Antenna and Array Technologies for Future Wireless Ecosystems* / ed. by Y. Jay Guo, R. W. Ziolkowski. Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2018. P. 285–303.

7. Bartlett M. *An Introduction to Stochastic Processes with Special References to Methods and Applications*. New York : Cambridge University Press, 1961.
8. Capon J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis // *Proceedings of the IEEE*. 1969. Vol. 57, № 8. P. 1408–1418.
9. Van Trees H. *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. New York : Wiley Interscience, 2002.
10. Schmidt R. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation // *IEEE Transactions on Antenna. Propagation*. 1986. Vol. AP-34, № 2. P. 276–280.
11. Нечаев Ю. Б., Пешков И. В., Аальмуттар Атхер Ю. О., Аль Хафаджи Сармад К. Д. Оценка вероятности появления ложных пиков кольцевых и концентрических антенных решеток при радиопеленгации со сверхразрешением // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Системный анализ и информационные технологии*. 2016. № 2. С. 16–23.
12. Frank B. G. *Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB*. New York : McGraw-Hill Professional, 2005. 288 с.
13. Сазонов Д. М. *Антенны и устройства СВЧ : учеб. для радиотехнических специальностей вузов*. М : Высш. шк., 1988. 432 с.
14. Пешков И. В., Жигулин В. А. Оценка качества результатов моделирования алгоритмов цифровой пеленгации для кольцевой антенной решетки // *Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы Всерос. науч.-техн. конф. (г. Самара, 25–28 апреля 2023 г.)*. Самара : ООО «Артель», 2023. С. 41–44.
15. Жигулин В. А., Нечаев Ю. Б. Моделирование алгоритмов цифровой пеленгации с учетом взаимного влияния элементов антенных решеток сантиметрового диапазона // *Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию кафедры радиофизики ВГУ (г. Воронеж, 18–20 апреля 2023 г.)*. Воронеж : Изд. дом ВГУ, 2023. С. 150–157.
16. Serdar O. A., Cevdet I. High-Resolution Direction-of-Arrival Estimation via Concentric Circular Arrays // *ISRN Signal Processing*. 2013. Vol. 2013, Article ID 859590.
17. Godara L. C. Applications of antenna arrays to mobile communications. Part I : performance improvement, feasibility, and system considerations // *Proceedings of the IEEE*. 1997. Vol. 85, № 8. P. 1195–1245.

References

1. Warnick K.F., Maaskant R., Ivashina M.V. et al. *Phased Arrays for Radio Astronomy, Remote Sensing, and Satellite Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018:470.
2. Kumar A., Ansari A.Q., Kanauji B.K. et al. A Review on Different Techniques of Mutual Coupling Reduction Between Elements of Any MIMO Antenna. Part 1: DGSs and Parasitic Structures. *Radio Science*. 2021;(56):1–25.
3. Parshin Yu.N., Gusev S.I., Frolov I.I. et al. The influence of mutual impedances of antenna array elements on the effectiveness of spatial signal processing. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2017;(60):17–26. (In Russ.)
4. Inshakov Yu.M., Osadchenko A.Yu. A virtual adaptive antenna array taking into account the mutual influence of its elements based on films-algorithm. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = Izvestiya higher educational institutions of Russia. Radio electronics*. 2015;(6):34–40. (In Russ.)
5. Parshin Yu.N., Komissarov A.V. The bandwidth of the MIMO technology of a telecommunications system in the conditions of a changing spatial structure of a radio path with artificial multipath. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. 2012;(1):50–55. (In Russ.)
6. Davidson D.B., Warnick K.F. Contemporary Array Analysis Using Embedded Element Patterns. *Antenna and Array Technologies for Future Wireless Ecosystems*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2018:285–303.
7. Bartlett M. *An Introduction to Stochastic Processes with Special References to Methods and Applications*. New York: Cambridge University Press, 1961.
8. Capon J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. *Proceedings of the IEEE*. 1969;57(8):1408–1418.
9. Van Trees H. *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. New York: Wiley Interscience, 2002.
10. Schmidt R. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. *IEEE Transactions on Antenna. Propagation*. 1986;AP-34(2):276–280.
11. Nechaev Yu.B., Peshkov I.V., Aal'muttar Atkheer Yu.O., Al' Khafadzhi Sarmad K.D. Estimation of the probability of false peaks of ring and concentric antenna arrays in radio direction finding with superresolution. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Sistemyy analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University. Ser.: System analysis and information technologies*. 2016;(2):16–23. (In Russ.)
12. Frank B.G. *Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB*. New York: McGraw-Hill Professional, 2005:288.

13. Sazonov D.M. *Antenny i ustroystva SVCh: ucheb. dlya radiotekhnicheskikh spetsial'nostey vuzov = Antennas and microwave devices : textbook for radio engineering specialties of universities*. Moscow: Vyssh. shk., 1988:432. (In Russ.)
14. Peshkov I.V., Zhigulin V.A. Evaluation of the quality of the results of modeling algorithms of digital pelen-gation for a ring antenna array. *Aktual'nye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. (g. Samara, 25–28 aprelya 2023 g.) = Actual problems of radio electronics and telecommunications : materials of the All-Russian scientific and technical conf. (Samara, April 25–28, 2023)*. Samara: ООО «Artel'», 2023:41–44. (In Russ.)
15. Zhigulin V.A., Nechaev Yu.B. Modeling of digital direction finding algorithms taking into account the mutual influence of antenna array elements in the centimeter range. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': sb. tr. XXIX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 70-letiyu kafedry radiofiziki VGU (g. Voronezh, 18–20 aprelya 2023 g.) = Radar, navigation, communications : collection of tr. XXIX International Scientific and Technical. conf., dedicated. to the 70th anniversary of the Department of Radiophysics of VSU (Voronezh, April 18–20, 2023)*. Voronezh: Izd. dom VGU, 2023:150–157. (In Russ.)
16. Serdar O.A., Cevdet I. High-Resolution Direction-of-Arrival Estimation via Concentric Circular Arrays. *ISRN Signal Processing*. 2013;2013, Article ID 859590.
17. Godara L.C. Applications of antenna arrays to mobile communications. Part I: performance improvement, feasibility, and system considerations. *Proceedings of the IEEE*. 1997;85(8):1195–1245.

Информация об авторах / Information about the authors

Илья Владимирович Пешков

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

Владимир Александрович Жигулин

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

Наталья Александровна Фортунова

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

Ilya V. Peshkov

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of physics,
radio engineering and electronics,
Bunin Yelets State University
(28 Kommunarov street, Yelets, Lipetsk region, Russia)

Vladimir A. Zhigulin

Master degree student,
Bunin Yelets State University
(28 Kommunarov street, Yelets, Lipetsk region, Russia)

Natalia A. Fortunova

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of physics,
radio engineering and electronics,
Bunin Yelets State University
(28 Kommunarov street, Yelets, Lipetsk region, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 17.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 19.10.2023

Принята к публикации/Accepted 20.11.2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.3.049.77

doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-5

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ ДИАГНОСТИКИ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

В. П. Перевертов¹, А. Г. Жданов², Н. А. Кузин³, В. Н. Новикова⁴, Н. К. Юрков⁵

^{1, 2, 4} Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

³ Московский автомобильный институт (технический университет), Москва, Россия

⁵ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ vpervertov@yandex.ru, ² zhdanov1965@mail.ru, ³ sputnik1985nk3y@mail.ru,

⁴ novikova@samgups.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* 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 (последнее 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). *Материалы и методы.* Анализ методов диагностики показал, что часть известных методов непригодна, другая – требует адаптации к наноматериалам, а значительная часть может быть определена только с помощью новых методов. *Результаты и выводы.* Показано, что использование лазерных, ультразвуковых, волоконно-оптических систем диагностики наноматериалов и сплавов в гибридных технологиях формообразования деталей в системе высокоскоростного подвижного состава позволит снизить инвестиционные и эксплуатационные расходы высокоскоростных железных дорог, повысить надежность при сохранении энергетических и динамических характеристик поездов по сравнению с подстанциями с дизельными электростанциями и электропоездами.

Ключевые слова: высокоскоростной транспорт, диагностика, контроль, датчики, технологии, композиты, сплавы, наноматериалы

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318>

Для цитирования: Перевертов В. П., Жданов А. Г., Кузин Н. А., Новикова В. Н., Юрков Н. К. К проблеме повышения надежности устройств диагностики наноматериалов в гибридных технологиях // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 53–61. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-5

ON THE PROBLEM OF INCREASING THE RELIABILITY OF NANOMATERIAL DIAGNOSTIC DEVICES IN HYBRID TECHNOLOGIES

V.P. Perevertov¹, A.G. Zhdanov², N.A. Kuzin³, V.N. Novikova⁴, N.K. Yurkov⁵

^{1,2,4} Samara State University of Railway Engineering, Samara, Russia

³ Moscow Automobile Institute (Technical University), Moscow, Russia

⁵ Penza State University, Penza, Russia

¹ vperevertov@yandex.ru, ² zhdanov1965@mail.ru, ³ sputnik1985nk3y@mail.ru,

⁴ novikova@samgups.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. Background. The term "optical coherence tomography" appeared many decades ago in works devoted to expanding the capabilities of low-coherence reflectometry for imaging the internal structure of turbid media. This term, despite not exactly matching the accepted concept of tomography (layer-by-layer image restoration by solving an inverse mathematical problem), is now recognized throughout the world. The purpose of the study is to analyze methods for diagnosing nanomaterials in hybrid technologies for forming parts in the transport engineering system (gas turbine motor-car trains made from new materials). **Materials and methods.** Analysis of diagnostic methods has shown that some of the known methods are unsuitable, others require adaptation to nanomaterials, and a significant part can only be determined using new methods. **Results and conclusions.** The work shows that the use of laser, ultrasonic, fiber-optic diagnostic systems for nanomaterials and alloys in hybrid technologies for forming parts in a high-speed rolling stock system will reduce investment and operating costs of high-speed railways, increase reliability while maintaining power and dynamic characteristics trains compared to substations with diesel power plants and electric trains.

Keywords: high-speed transport, diagnostics, control, sensors, technologies, composites, alloys, nanomaterials

Financing: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318>

For citation: Perevertov V.P., Zhdanov A.G., Kuzin N.A., Novikova V.N., Yurkov N.K. On the problem of increasing the reliability of nanomaterial diagnostic devices in hybrid technologies. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(4):53–61. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-5

На основе системного подхода к анализу эволюции развития технологий и создания умных производственных систем (УПС), составными элементами которой являются гибкие производственные системы (ГПС), модули (ГПМ) (рис. 1), робототехнологические комплексы, рассмотрены вопросы диагностики наноматериалов, композитов, сплавов и т.д. для гибридных технологий формообразования деталей ГТД на основе лазерной, ультразвуковой и волоконно-оптической техники.

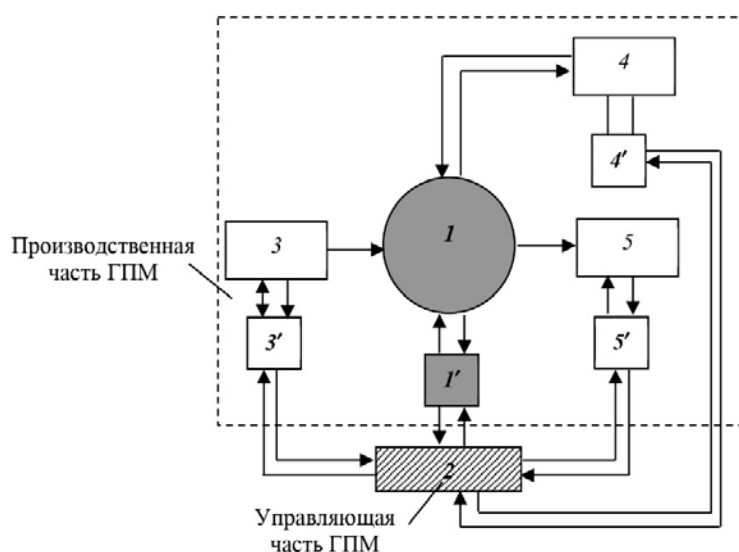


Рис. 1. Структурно-функциональная модель гибкого производственного модуля обработки материалов давлением: 1 – технологическое оборудование – винтовой пресс, молот и т.п.; 1' – система управления технологическим оборудованием; 2 – система управления ГПМ; 3 – устройство (робот) подачи заготовок (УПЗ); 3' – система управления УПЗ, устройство (робот) подачи штампового инструмента (УПШИ); 4 – система управления УПШИ; 5 – устройство (робот) подачи поковок (УПП); 5' – система управления УПП

Трендом индустрии XXI в. являются аддитивные технологии (АТ): «послойное сплавление (спекание) порошков из разных материалов и сплавов, включая композиционные и нанокристаллические, позволяющее в автоматизированном цифровом режиме строить трехмерные изделия по компьютерной модели; сократить время и затраты на получение изделия; изучать технологию послойного синтеза (диагностика) металлических, металлокерамических и наноструктурированных порошковых композитов; внедрить производительные лазерные, плазменные и ионные системы для спекания и сплавления металлопорошковых композиций; создать на основе новых датчиков системы контроля, диагностики и интеллектуального управления гибридными технологиями (традиционные и аддитивные технологии), обеспечивающих высокое качество и надежность транспортной железнодорожной системы» [1, 2].

Основным элементом системы подвижного состава (ПС) является силовая установка: дизельная, газогенераторная, газодизельная, газотурбинная. В газотурбинных поездах (систем) основой является газотурбинный двигатель (ГТД), изготовленный из новых материалов и сплавов [3–13].

Анализ строительства высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ) для перевозки пассажиров и грузов показал, что риском инвестиционных проектов является длительный срок окупаемости, надежность и безопасность железнодорожного подвижного состава, что необходимо учитывать планы развития смежных видов транспорта: скоростных автомагистралей, авиационного сообщения [4, 5].

Создание мотор-вагонных поездов, работающих на газотурбинных двигателях (ГТД) и электрической передаче переменного-постоянного тока, обеспечит сокращение сроков окупаемости дорог. Эксплуатационный режим силовых установок высокоскоростных поездов характеризуется работой на номинальной мощности, ключевую роль в движении приобретают требования малого веса и аэродинамической формы высокоскоростного ПС, что позволит заменить электропоезда автономными газотурбинными мотор-вагонными поездами в грузовом движении, оснащенных системами диагностики параметров ГТД. Преимущества применения ГТД [4, 5] заключаются в улучшении управляемости поездом, повышении разгонных и тормозных характеристик, безопасности движения, энергоэффективности данного вида тяги, росте пропускных способностей железных дорог. Сравнивая мощность созданного в России газотурбовоза ГТh1 – 8500 кВт с суммарной мощностью 10-вагонного высокоскоростного электропоезда «Сапсан», возможно создание автономного мотор-вагонного поезда с несколькими ГТД, сопоставимого по мощности мотор-вагонному поезду электрической тяги. Компонировка силовой установки турбопоездов с ГТД должна включать: кабину управления – силовую установку – газовый баллон – прицепные вагоны и т.д. [4, 5, 14].

При оценке методов контроля и диагностики в области нанотехнологий в системе скоростного транспортного (железнодорожного) машиностроения для ВСМ необходим экспертный анализ методов с концептуальными признаками:

- 1) проектирование технологий диагностики как параметров ГТД, так и транспортной системы (ВСМ) в целом;
- 2) разработка алгоритма выбора технологических датчиков, включая интеллектуальные датчики (ИД) для технологий искусственного интеллекта, основы производственных систем УПС;
- 3) контроль и диагностика технологий в наномасштабном диапазоне при гибридных технологиях на основе концентрированных источников энергии [1–3, 6–12].

Также проблема возникает и в отношении новых материалов, сплавов, нанокомпозитов в системе ГТД, выделении из них относящихся не только по наномасштабу, но и обладающих свойствами выделяющими их наноэффектами в сравнении с традиционными материалами, имеющих более высокие характеристики [1, 2, 6–13].

Несмотря на затраты на их разработку и сложные технологические операции в нанодиапазоне, на совершенствование измерительной и диагностической системы (техники), необходим диагностический контроль параметров и оценка требуемых эффектов.

В настоящее время существуют методы диагностики и методики исследования физических и физико-химических параметров и характеристик твердотельных и молекулярных структур [1–3, 6–8, 13].

Получение наноструктурных систем и новых наноструктурированных материалов с заданными свойствами ставит и новые **диагностические задачи**, для решения которых требуется адаптация к этим задачам традиционных методов (оборудования, датчики, исполнительные органы), а также

развитие новых методов исследования и анализа свойств и процессов, присущих объектам нанометровой геометрии [1–3, 6, 9].

Анализ методов диагностики показал, что часть известных методов непригодна, другая – требует адаптации к наноматериалам, а значительная часть характеристик может быть определена только с помощью новых методов, определяющих свойства веществ в наносостоянии. Методы нанодиагностики должны быть неразрушающим и давать информацию не только о структурных свойствах нанобъектов, но и об их электронных свойствах с атомным разрешением [1–3, 9, 13].

Для разработки нанотехнологий необходимо контролировать и диагностировать атомные и электронные процессы, оптические, магнитные, механические и другие свойства нанобъектов. Невозможность выполнения этих требований приводит к использованию комплекса методов диагностики скоростных транспортных нанобъектов, среди которых выделим основные группы [3]:

1) **электронная микроскопия высокого разрешения** обеспечивает визуализацию структуры нанобъектов с атомным разрешением на основе различных модификаций электронной микроскопии, обеспечивающих проведение химического анализа нанобъектов, включая поверхностно-чувствительные методы, которые являются единственным источником получения информации о внутренней структуре материала;

2) **методы сканирующей электронной микроскопии** приближаются к атомному разрешению, получению информации без разрушающего воздействия на исследуемые объекты с получением информации о химическом составе нанобъектов, их электрических, оптических и других свойствах;

3) **методы электронной томографии** применяются для получения информации об объеме нанобъектов;

4) **сканирующая туннельная микроскопия**, являющаяся поверхностно-чувствительным методом визуализации атомной структуры твердых тел при проведении спектроскопических исследований с атомным разрешением при повышенных и пониженных температурах, использование других методов зондовой микроскопии с возможностью манипулирования (моделирования) на уровне отдельных атомов делает эти методы важнейшими инструментом для нанотехнологии и нанодиагностики;

5) **рентгendifракционные методы** дают информацию об атомной структуре нанобъектов без их разрушения;

6) **методы электронной спектроскопии для химического анализа материалов и сплавов;**

7) **методы фотоэлектронной и инфракрасной спектроскопии;**

8) **методы фотолюминесценции** с повышенной разрешающей способностью полезны при диагностике нанобъектов;

9) **методы диагностики, встроенные в технологию** и учитывающие специфику транспортных нанобъектов и их характерные размеры, являются частью развития **высоких технологий** получения и анализа свойств наноструктурных материалов изделия.

Формирование комплексных методов практической диагностики вызвано технологическими задачами получения наноструктур и создания на их основе поколения электронных и оптических устройств (транзисторов, лазеров и др.) с физико-химическими свойствами, не входящую в область стандартных представлений о свойствах вещества.

Качественный уровень исследований возможен только на современной экспериментальной базе на основе многофункциональных комплексов датчиковой системы, позволяющих интенсифицировать процесс при их проведении за счет их высокой загрузки, повышающих эффективность его использования, способных выполнять любые задачи данного профиля [1–6, 9–14].

В основе алгоритма выбора технологических датчиков для обеспечения измерений параметров ГТД лежит принцип максимального соответствия требований измерений и возможностей (характеристик) датчика, что требует знаний об объекте измерений и о датчиках, из которых должен быть сделан выбор. Если требуемого соответствия нет, то необходимо убедиться, что требования к датчику являются принципиально реализуемыми, а затем приступить к разработке (поиску) датчика.

Алгоритм реализации **принципа максимального соответствия требований и возможностей** сводится к следующему:

1. Формулируются исходные данные: диапазон измерения параметра и агрегатное состояние объекта измерения. Результатом является совокупность датчиков определенного назначения, основанных на разных принципах преобразования, диапазон работы которых включает в себя требуемый

диапазон измерений. На всех этапах выбора датчика является выполнение требований данного измерения.

2. Обоснование выбора мест измерений параметра – экстремальность параметра в данном месте; представительность для описания общей картины процессов на объекте; корреляция данного параметра с другими параметрами, измерение которых намечается, доступность размещения датчика и рассмотрение альтернативных реализаций измерения требуемого параметра в данном месте.

3. Выбираются датчики для измерений данного параметра с чувствительными элементами с сосредоточенными параметрами.

4. Из выбранных датчиков отбираются работоспособные в эксплуатационных условиях с учетом требований как общеклиматических (температура окружающей среды, давление, влажность и т.д.), механических (вибрации, удары, линейные и угловые ускорения и т.д.), так и общесистемных специальных требований (агрессивность среды, температура и давление среды, цикличность и многообразие воздействий, проникающая радиация и т.д.). Совокупное воздействие всех факторов на датчик существенно жестче, чем раздельное воздействие каждого фактора. Отбираются датчики, принцип преобразования в которых обеспечивает необходимое метрологическое качество.

5. Выбор датчиков по динамическим характеристикам на соответствие динамике измеряемого параметра. Динамическая погрешность датчиков должна соответствовать допустимым значениям. В случае несоответствия должна быть рассмотрена возможность введения корректирующих поправок в результате измерений, которая предполагает априорные знания о динамике процесса и динамических характеристиках выбранного датчика, включая кратковременность исследуемого процесса. Точность и динамичность находится в постоянном противоречии с его механической и метрологической надежностью.

6. Выбор датчиков по принципу системной совместимости. Если в результате отбора остаются альтернативные варианты датчиков, то для их выбора используется принцип системной совместимости. Измерения проводятся как многопараметрические, так и отдельными средствами (датчики), которые комплектуются в информационно-измерительные системы на основе единства принципа преобразования в используемых датчиках (минимальное число принципов преобразования) [1, 2, 4–8, 14].

Особенности контроля качества в аддитивном производстве деталей машин ГТД газотурбовозов [4, 5] – это параметры, которые влияют на качество продукции:

1. Мы не можем увидеть качество 3D-печати внутри изделия. Мы можем контролировать наружную поверхность, но не качество спекания металлического порошка внутри.

2. Всегда необходимо контролировать саму геометрию изделия, потому что после процесса выращивания изделия, а также после различных процессов постобработки (термических, механических и др.) геометрия изделия может меняться, что необходимо учитывать и компенсировать при моделировании САД-модели.

3. Потребность во входном контроле расходных материалов (металлопорошковых композиций).

Для решения таких задач применяется технология промышленной компьютерной томографии (КТ) – метод восстановления внутренней структуры объекта посредством многократного просвечивания в различных пересекающихся направлениях.

В начале технологии изготовления изделий в аддитивном производстве нужно применять КТ для отработки режимов синтеза, так как каждое изделие уникально, как и все параметры для его изготовления, их лучше подобрать еще до выращивания изделия, чтобы сократить процент негодной продукции (брак) и сэкономить расходный материал, обнаружить дефекты или пустоты в образце при текущих режимах синтеза и при необходимости их скорректировать. После изготовления детали ГТД, несмотря на заранее подобранные режимы для синтеза, необходимо выполнить ее полный контроль, чтобы выявить возможные дефекты, приводящие к отказам. После проведения КТ были обнаружены и локализованы пустоты, что критично при эксплуатации изделия; обнаружить и провести исследования по воздействию механической нагрузки на изделие. Необходим как контроль параметров внутри изделия, так и контроль внешней геометрии (линейно-угловые размеры, отклонения формы – цилиндричность, соосность и т.п.). На геометрию влияют режимы построения детали, расположение изделия внутри камеры построения 3D-принтера. После выращивания 3D-модели обязательным этапом в аддитивном производстве является термическая обработка, вызванная деформацией геометрии изделия. КТ позволяет отработать все необходимые режимы на этих этапах, чтобы в итоге получилась модель, отвечающая всем геометрическим параметрам.

Аддитивные технологии (АТ) позволяют уменьшить влияние человеческого фактора на качество получаемых изделий, поскольку изготовление производится в автоматизированном режиме обработки технологическими датчиками, включая интеллектуальные, повышает качество за счет получения заготовок по конфигурации близкой к размерам конечного изделия [1–3, 6–14].

Отличительной **особенностью** интеллектуальных датчиков ИД является **цифровая** обработка сигнала непосредственно с выхода первичного функционального преобразователя (ФП). Это гарантирует высокую точность и стабильность его характеристик во всех допустимых диапазонах измерений, а также низкую чувствительность к внешним помехам, позволяет одновременно с результатами измерения передавать данные для диагностики и мониторинга. Цифровая обработка сигнала и возможность модернизации программного обеспечения, позволяют реализовать различные функции преобразования контролируемых величин, с дальнейшим совершенствованием характеристик и выполняемых функций датчика. Передача измеренной величины происходит по последовательному каналу связи в цифровом коде. Ввод сигнала в автоматических системах управления технологическими процессами ГПМ на промышленных компьютерах может осуществляться через стандартный СОМ-порт или через шину USB. Наличие модификаций с выходным сигналом 4–20 мА и 0–5 В позволяет использовать ИД в составе систем сбора информации с аналоговыми каналами или для замены аналоговых датчиков температуры типа ИРТ 4, 5–13.

Стандарт IEEE P1451.1 определяет смешанный интерфейс (рис. 2), в котором с обычным сигналом аналогового датчика используется цифровой канал доступа к электронной спецификации TEDS, встроенной в датчик в целях самоидентификации. В обычном режиме работы выходной сигнал такого датчика является аналоговым. При поступлении от пользователя специальной команды датчик начинает передавать цифровую информацию. Передача цифровых данных осуществляется по той же паре проводников, при помощи которой подается напряжение питания и которая используется для передачи выходного высокочастотного аналогового сигнала. По окончании цифровой передачи линия связи вновь подключается к аналоговым выходным цепям датчика [2, 9–14].

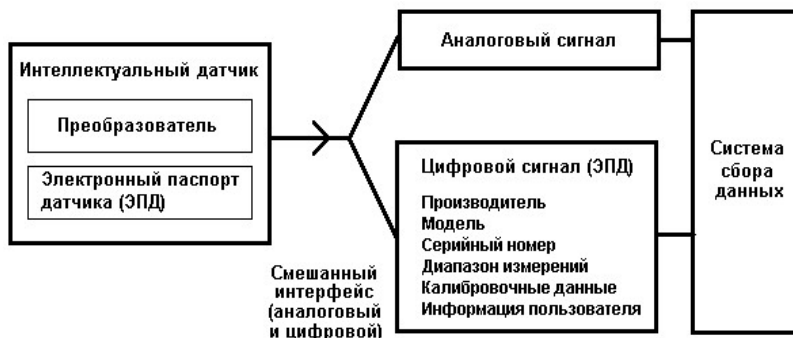


Рис. 2. Смешанный интерфейс TEDS-датчиков

Реализация этого стандарта IEEE P1451.1 позволит отказаться от традиционной практики учета использования датчиков, снизить затраты, связанные со сбором данных, их проверкой и анализом в системах и т.д., применяющихся в промышленных условиях. Система, оборудованная интеллектуальным датчиком, автоматизирует этот процесс, считывая его параметры по цифровому каналу с чипа ЭПД, позволяет реализовать автоматическое конфигурирование датчика и упростить его согласование с другой электронной аппаратурой. Датчики TEDS сами определяют себя в системе, не нужно следить за тем, к какому каналу подключен тот или иной датчик [1, 2, 9, 13, 14].

Заключение

1. Формирование комплексных методов практической нанодиагностики материалов деталей ГТД вызвано технологическими задачами получения наноструктур и создания на их основе электронных и оптических устройств (лазеров и др.) с физическими, физико-химическими свойствами, не входящую в область стандартных представлений о свойствах вещества.

2. Анализ аддитивных технологий 3D- (4D-печать) послойного синтеза металлических, металлокерамических и наноструктурированных порошковых композиций формообразования деталей скоростного железнодорожного транспорта (газотурбинные поезда) показал тренд внедрения в

промышленность высокопроизводительных лазерных, плазменных и ионно-плазменных технологических систем для спекания и сплавления металлпорошковых «умных» композиций, оснащенных системами диагностического (интеллектуального) управления технологиями, обеспечивающих надежность оборудования и качество продукции.

3. Инфраструктура инновационной деятельности ОАО «РЖД» развивается на основе создания технопарков, основными задачами которых являются повышение: эффективности использования научного оборудования высококвалифицированными специалистами; качества исследований и образования путем формирования исследовательских комплексов, отвечающих мировым стандартам ИСО по техническим и эксплуатационным характеристикам; квалификации сотрудников с разработкой новых методов и методик научных исследований «Индустрия наносистем и материалов», «Нанотехнологии и наноматериалы», « Датчики (интеллектуальные)» и выполнении прикладных исследований вузов; а также проведение симпозиумов инновационной деятельности.

4. Реализация стандарта IEEE P1451.1 (ИСО) в транспортных железнодорожных системах, оборудованных интеллектуальным датчиком, позволит автоматизировать технологический процесс, считывая его параметры по цифровому каналу с чипа и реализовать автоматическое конфигурирование датчика, упростив его согласование с другой электронной аппаратурой системы.

Список литературы

1. Перевертов В. П. Качество управления гибкими технологиями : монография. Самара : СамГУПС, 2019. 270 с.
2. Перевертов В. П. Материаловедение и гибкие технологии : учебник. Самара : СамГУПС, 2020. 280 с.
3. Алферов Ж. И., Копьев П. С., Сурис Р. А. [и др.]. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3–13.
4. Зайцев А. А., Троицкий П. С. Мотор-вагонные грузовые электропоезда – альтернатива локомотивной тяге. Сравнение и анализ // Мир транспорта. 2019. № 17. С. 72–81. doi: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-72-81
5. Буйносов П. А., Лаптев С. И. Организация обслуживания и ремонта газотурбовозов ГТ1h // Вестник УрГУПС. 2018. № 3. С. 43–55.
6. Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Качество формообразования деталей при интеграции гибридных технологий транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 72–80.
7. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Андрончев И. К. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 85–95.
8. Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Классификация наноматериалов для традиционных и аддитивных технологий в системе транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 70–77.
9. Перевертов В. П. Диагностика и управление кузнечными машинами в гибких производственных системах : монография. Самара : СамГУПС, 2021. 291 с.
10. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. Система диагностирования и технического обслуживания НТТС и ПС в условиях РЖД // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 93–95.
11. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Романенко А. А. Нанотехнологии и качество деталей транспортного машиностроения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 39–42.
12. Жданов А. Г., Перевертов В. П. Повышение надежности тормозной системы подвижного состава // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 2. С. 128–130.
13. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Кузин Н. А., Цыганова С. А. К вопросу диагностики наноматериалов в гибридных технологиях формообразования деталей в системе машиностроения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 447–449.
14. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации : учебник. М. : ИНФРА-М, 2023. 365 с.

References

1. Perevertov V.P. *Kachestvo upravleniya gibkimi tekhnologiyami: monografiya = The quality of management of flexible technologies: monograph*. Samara: SamGUPS, 2019:270. (In Russ.)
2. Perevertov V.P. *Materialovedenie i gibkie tekhnologii: uchebnik = Materials science and flexible technologies: textbook*. Samara: SamGUPS, 2020:280. (In Russ.)
3. Alferov Zh.I., Kop'ev P.S., Suris R.A. et al. Nanomaterials and nanotechnology. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem technology*. 2003;(8):3–13. (In Russ.)

4. Zaytsev A.A., Troitskiy P.S. Motor-wagon freight electric trains – an alternative to locomotive traction. Comparison and analysis. *Mir transporta = The world of transport*. 2019;(17):72–81. (In Russ.). doi: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-72-812
5. Buynosov P.A., Laptev S.I. Organization of maintenance and repair of GT1h gas turbine locomotives. *Vestnik UrGUPS = Bulletin of the UrGUPS*. 2018;(3):43–55.
6. Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. The quality of forming parts when integrating hybrid technologies of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):72–80. (In Russ.)
7. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Andronchev I.K. Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming machine-building parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):85–95. (In Russ.)
8. Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. Classification of nanomaterials for traditional and additive technologies in the system of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):70–77. (In Russ.)
9. Perevertov V.P. *Diagnostika i upravlenie kuznechnymi mashinami v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh: monografiya = Diagnostics and control of forging machines in flexible production systems: monograph*. Samara: SamGUPS, 2021:291. (In Russ.)
10. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Yurkov N.K. The system of diagnostics and maintenance of NTTS and PS in the conditions of Russian Railways. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:93–95. (In Russ.)
11. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Romanenko A.A. Nanotechnology and quality of parts of transport engineering. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:39–42. (In Russ.)
12. Zhdanov A.G., Perevertov V.P. Improving the reliability of the braking system of rolling stock. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;2:128–130. (In Russ.)
13. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Kuzin N.A., Tsyganova S.A. On the issue of diagnostics of nanomaterials in hybrid technologies of forming parts in the mechanical engineering system. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:447–449. (In Russ.)
14. Shishov O.V. *Programmiruemye kontrollery v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii: uchebnik = Programmable controllers in industrial automation systems : textbook*. Moscow: INFRA-M, 2023:365. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Петрович Перевертов

кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры наземных транспортно-технологических средств,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В)
E-mail: vpervertov@yandex.ru

Андрей Геннадьевич Жданов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры наземных транспортно-технологических средств,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В)
E-mail: zhdanov1965@mail.ru

Николай Андреевич Кузин

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

Valeriy P. Perevertov

Candidate of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of land transport and technological facilities,
Samara State University of Transport
and Communications
(2V Svobody street, Samara, Russia)

Andrey G. Zhdanov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of land transport and technological facilities,
Samara State University of Transport
and Communications
(2V Svobody street, Samara, Russia)

Nikolai A. Kuzin

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

Вера Николаевна Новикова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры наземных транспортно-
технологических средств,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В)
E-mail: novikova@samgups.ru

Николай Кондратьевич Юрков

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

Vera N. Novikova

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of land transport and technological facilities,
Samara State University of Transport
and Communications
(2V Svobody street, Samara, Russia)

Nikolay K. Yurkov

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

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

Поступила в редакцию/Received 10.08.2023

Поступила после рецензирования/Revised 26.10.2023

Принята к публикации/Accepted 20.11.2023

СПОСОБЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ АДАПТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПОИСКА СООТВЕТСТВИЙ НА СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ

А. В. Зубарь¹, О. В. Духанов², А. А. Громов³, А. Ю. Тычков⁴

^{1, 2, 3} Филиал Военной академии материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

⁴ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ alexey_zubar@mail.ru, ² duhanov3@gmail.com, ³ darkzgrom@gmail.com, ⁴ tychkov-a@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* 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. *Материалы и методы.* Задача, на решение которой были направлены предлагаемые способы автоматического определения положения области поиска соответствий, заключалась в построении ограниченной с двух сторон и адаптивной по форме, характеру дисторсии области поиска объекта на стереоизображении при условии обеспечения возможности быстрой ее перестройки в случаях динамичного изменения взаимного положения в пространстве цифровых видеоканалов с известными и неизвестными внутренними параметрами. В результате были разработаны два способа автоматического определения границ и положения адаптивной области поиска, основанные на вычислении значений массивов, содержащих координаты пикселей области поиска объекта на стереоизображении. Свойство адаптивности области поиска в данном случае заключалось в автоматической изменчивости ее формы и размеров в соответствии с геометрическими искажениями изображений и текущим взаимным положением видеоканалов. *Результаты.* Повышение быстродействия по сравнению с существующими способами определения областей локального поиска соответствий достигнуто за счет отсутствия необходимости предварительных попиксельной обработки изображений, вычисления фундаментальной матрицы и решения сложных систем уравнений. *Выводы.* В результате обеспечено снижение требований к вычислительным ресурсам ЭВМ и проведение в реальном времени автоматического поиска соответствий на искаженных изображениях с динамично меняющих свои пространственные положение и ориентацию видеоканалов высокого разрешения. Кроме этого, упрощена реализация системы технического зрения за счет возможности применения видеоканалов с неизвестными техническими параметрами.

Ключевые слова: ректификация, эпиполярная линия, оптико-электронный канал, система технического зрения, поиск соответствий, стереоизображение

Для цитирования: Зубарь А. В., Духанов О. В., Громов А. А., Тычков А. Ю. Способы автоматического определения границ адаптивных областей поиска соответствий на стереоизображениях // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 62–76. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-6

WAYS TO AUTOMATICALLY DETERMINE THE BOUNDARIES OF ADAPTIVE MATCHING AREAS ON STEREO IMAGES

A.V. Zubar¹, O.V. Dukhanov², A.A. Gromov³, A.Yu. Tychkov⁴

^{1, 2, 3} Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

⁴ Penza State University, Penza, Russia

¹ alexey_zubar@mail.ru, ² duhanov3@gmail.com, ³ darkzgrom@gmail.com, ⁴ tychkov-a@mail.ru

Abstract. *Background.* An analysis of existing methods for automatically searching for correspondence in stereo images has shown that there are problematic issues in the field of automating the search for correspondence in stereo pairs from the point of view of simultaneously minimizing computational costs and ensuring the accuracy of calculations. They are associated, first of all, with the automatic determination of the position of the search area, limited on

both sides and adaptive in shape and nature of distortion, under the conditions of ensuring the possibility of its restructuring in real time with dynamic changes in the relative position in the space of video channels with known and unknown internal parameters, and also when processing high-resolution images without their preliminary pixel-by-pixel processing. *Materials and methods.* The problem to be solved by the proposed methods for automatically determining the position of the search area for correspondence was to construct a search area for an object in a stereo image that is limited on both sides and adaptive in shape by the nature of the distortion, provided that it is possible to quickly rearrange it in cases of dynamic changes in the relative position in the space of digital images. video channels with known and unknown internal parameters. As a result, two methods were developed for automatically determining the boundaries and position of the adaptive search area, based on calculating the values of arrays containing the pixel coordinates of the object search area in a stereo image. The adaptive property of the search area in this case consisted in the automatic change of its shape and size in accordance with the geometric distortions of the images and the current relative position of the video channels. *Results.* Increased performance compared to existing methods for determining areas of local search for correspondence is achieved due to the absence of the need for preliminary pixel-by-pixel image processing, calculation of the fundamental matrix and solving complex systems of equations. *Conclusions.* As a result, the requirements for computer computing resources have been reduced and the real-time automatic search for matches in distorted images from high-resolution video channels dynamically changing their spatial position and orientation has been achieved. In addition, the implementation of a technical vision system is simplified due to the possibility of using video channels with unknown technical parameters.

Keywords: rectification, epipolar line, optical-electronic channel, technical vision system, search for correspondence, stereo image

For citation: Zubar A.V., Dukhanov O.V., Gromov A.A., Tychkov A.Yu. Ways to automatically determine the boundaries of adaptive matching areas on stereo images. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):62–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-6

Введение

При разработке систем технического зрения (СТЗ), обеспечивающих определение координат объектов по их цифровым изображениям, одним из ключевых моментов является точность, робастность и вычислительная реализуемость применяемого алгоритма автоматического поиска соответствий на стереоизображениях. Возможность выполнения всех предусмотренных измерений и их обработки в реальном времени на ЭВМ с ограниченной вычислительной мощностью является весьма актуальной задачей. Ее решение во многом определяет правильный выбор способа поиска, формирующий основу для построения специализированных алгоритмов обработки цифровых изображений.

В настоящее время различают глобальный и локальный поиск соответствий на стереопарах [1–7].

Глобальный поиск основывается на минимизации функционала энергии, когда находят расхождение сразу для множества точек (объектов) обрабатываемых изображений. Как правило, такие задачи связаны с трехмерной реконструкцией наблюдаемой сцены по множеству разноразмерных изображений. Общий недостаток глобального поиска – это высокая вычислительная сложность.

Особенность локального поиска заключается в том, что поиск соответствий в нем организуется путем последовательного сканирования между локальными участками изображений, как правило, это некоторая интересующая область одного изображения и область поиска на другом изображении.

В свою очередь, размеры областей поиска и порядок их нахождения будут определять точность поиска и требования к вычислительной мощности ЭВМ.

Самый простой по реализации способ определения положения области поиска (при локальном поиске) может быть применен в СТЗ, предполагающей прием цифровых изображений по крайней мере с двух одинаковых фото или видеоканалов, расположенных в пространстве строго параллельно друг другу и на одной базовой линии. В этом случае, если на изображении 1 левого оптико-электронного канала (ОЭК) выделена несущая информацию об интересующем объекте область 4 с центром в точке 3, то на изображении 2 правого ОЭК участок 6 изображения данного объекта с центром в точке 5 будет иметь такие же вертикальные координаты, что и на изображении 1 (рис. 1).

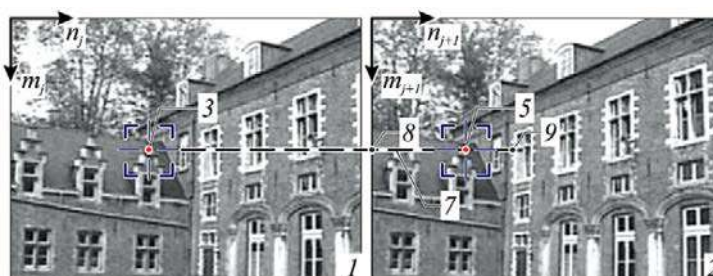


Рис. 1. Иллюстрация реализации поиска соответствий для параллельных ОЭК

Тогда область поиска 7 на изображении 2 может быть ограничена линией от точки 8 до точки 9. Точка 8 характеризует ближайшую, а точка 9 – бесконечно удаленную границы области поиска 7. При этом пиксельные координаты n_{j+1} и m_{j+1} удаленной границы 9 на изображении 2 будут равны пиксельным координатам n_j и m_j центра 3 области 4, характеризующей положение объекта интереса на изображении 1. Ближайшая граница 8 области поиска 7 при таком расположении ОЭК будет находиться на левом крае изображения 2 ($n_{j+1} = 0$) с такой же вертикальной координатой m_{j+1} , что и у границы 9.

Недостаток данного способа заключается в ограниченности его применения в связи с необходимостью использования только одинаковых ОЭК и в требованиях по обеспечению точного их параллельного размещения в пространстве. Особенно последнее является критичным для применения СТЗ на движущихся мобильных платформах, где ударные и вибрационные нагрузки могут приводить к колебаниям и деформациям корпуса, в том числе и в местах крепления ЭОК, что делает условие обеспечения абсолютной параллельности ОЭК если не практически, то трудно реализуемым.

Нивелирование требования по обеспечению параллельного размещения ОЭК (причем только в вертикальной и горизонтальной их взаимной ориентации) может быть достигнуто путем расширения области поиска 7, при этом в максимуме область поиска 7 может охватывать практически все изображение 2 (рис. 2,а). Однако в этом случае многократно увеличивается количество операций и, соответственно, растут требования к вычислительной мощности ЭВМ. Также достаточно высока вероятность ложного результата поиска в связи с возможностью нахождения в кадре идентичных по форме, ракурсу и окраске объектов (рис. 2,б).

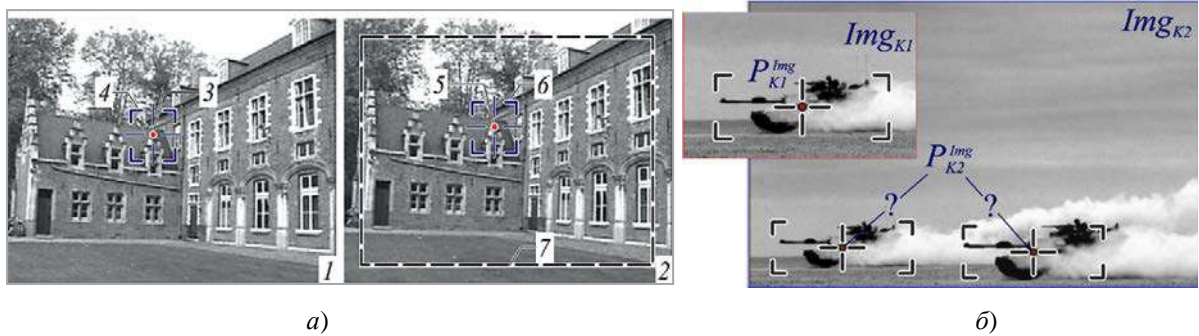


Рис. 2. Иллюстрация реализации поиска соответствий по всему изображению

Все это приводит к тому, что в настоящее время данный метод практически не применим, особенно в тех случаях, когда стоит необходимость проведения измерений в реальном масштабе времени с произвольно расположенных и разных по своим техническим параметрам цифровых ОЭК на базе маломощной ЭВМ.

Более совершенным является способ определения положения области поиска соответствий на цифровых изображениях, основанный на их ректификации. Сущность ректификации заключается в репроекции плоскостей изображений 1 и 2 таким образом, чтобы они находились в одной плоскости, в результате чего область поиска 7 преобразуется к горизонтальной линии (рис. 3, а). При этом если изображение 1 получено с левого ОЭК, а изображение 2 – с правой, то ближняя граница 8 области поиска 7 будет находиться на левом крае изображения 8, а дальняя граница 9 – на его правом крае. Вертикальная же координата m_{j+1} , задающая положение области поиска 7 на изображении 2, определяется соответствующей координатой m_j центра 3 области интереса 4 на изображении 1.

Различают несколько видов ректификаций, например, планарную, полярную. Вместе с этим общими недостатками организации поиска по ректифицированным изображениям являются:

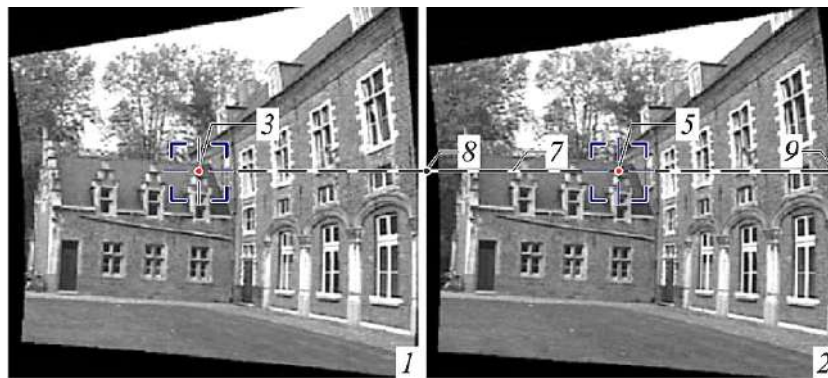
- невозможность проведения ректификации в реальном времени для изображений, полученных с динамично меняющих свое взаимное положение ОЭК;
- необходимость установления с высокой точностью всех внутренних, в том числе и случайных, параметров ОЭК;

– сложность осуществления расчетов в реальном времени для изображений высокого разрешения из-за большого количества вычислений, связанных с полной попиксельной переработкой пары изображений;

– ограниченная возможность применения ректификации, в частности, при обработке дисторсионно-искаженных и «разноракурсных» изображений;

– после проведения ректификации изображения интересующих объектов могут быть настолько деформированы, что само по себе вычисление меры сходства станет невозможным.

Также на сегодняшний день широко применяется способ определения положения области поиска соответствий на цифровых изображениях вдоль эпиполярных линий. Нахождение положения эпиполярных линий базируется на модели эпиполярной геометрии, согласно которой все эпиполярные прямые проходят через эпицентр, а множество эпиполярных плоскостей представляет собой однопараметрическое семейство плоскостей. И если на изображении 1 указан объект (рис. 3,а), то для данного взаимного положения ОЭК на изображении 2 существует только одна линия 7, на которой возможно нахождение изображения этого объекта.



а)



б)

Рис. 3. Проведение поиска соответствий с применением ректификации изображений и вдоль эпиполярных линий

Очевидным достоинством такого подхода к определению положения области поиска по сравнению с ректификацией является отсутствие необходимости попиксельной переработки изображений, а из этого следует уменьшение количества вычислительных операций и повышение достоверности результата поиска, так как поиск осуществляется по оригинальным изображениям. С другой стороны, при нахождении эпиполярных линий так же, как и при ректификации, предварительно должна быть вычислена фундаментальная матрица, для построения которой необходимо точно знать все внутренние параметры ОЭК и их взаимную ориентацию. Следовательно, продуктивность этого способа в случае, когда внутренние параметры ОЭК или неизвестны вовсе, или известны ограниченно, а сами ОЭК постоянно меняют свою ориентацию, а поиск необходимо осуществлять по видео-ряду в реальном масштабе времени, будет снижена.

Другой важный недостаток связан с тем, что модель эпиполярной геометрии не учитывает дисторсионные искажения изображений. Так, на рис. 4 показано, что, если изображения 1 и 2 искажены

радиальной и тангенциальной дисторсией, область поиска 7 должна иметь искривленную форму. Модель эпиполярной геометрии не предполагает построение кривых, а следовательно, для нахождения соответствующей эпиполярной линии необходимо или применять высококачественную и дорогую оптику, или осуществлять программную коррекцию изображений, опять же связанную с их полной попиксельной переработкой. Это многократно увеличивает количество вычислительных операций и время на поиск, а также потребует для проведения измерений в реальном масштабе времени высокопроизводительной СТЗ с мощным графическим процессором. Для маломощных мобильных СТЗ с учетом обеспечения проведения измерений по искаженным дисторсией изображениям высокого разрешения в реальном времени такой метод определения положения области поиска может оказаться неприменим.

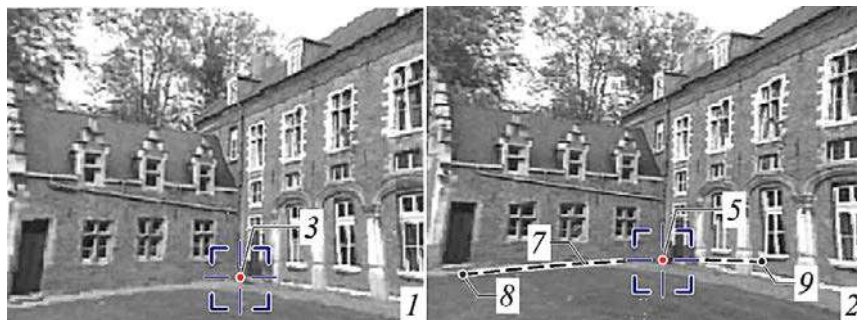


Рис. 4. Адаптация формы области поиска искажениям изображений

Кроме этого, для определения положения области поиска 7 на изображении 2 вдоль эпиполярной линии эпиполярная плоскость принимается безразмерной. В связи с этим область поиска 7 проходит через все изображение 2, и для большинства случаев съемки это вполне справедливо. Но вместе с этим в отдельных ситуациях взаимная ориентация ОЭЖ может оказаться такова, что область поиска 7 должна проходить по части изображения. При этом ближняя граница 8 области поиска 7 может быть задана из условия минимальной дальности до интересующего объекта, а дальняя граница 9 – максимальной дистанцией, на которой ошибки измерений не превысят некоторое установленное значение, или дальностью, за которой все объекты будут рассматриваться как равноудаленные. Введение таких дополнительных ограничений еще больше будет способствовать уменьшению размеров области поиска и, как следствие, – снижению количества вычислительных операций при непосредственном проведении поиска.

Из этого следует, 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 ОЭЖ с известными и неизвестными внутренними параметрами, а также при обработке изображений высокого разрешения без их предварительной попиксельной переработки. Данный факт определяет потребность разработки способов определения положения ограниченной с двух сторон и адаптивной по форме и характеру дисторсии области поиска при условии обеспечения возможности быстрой ее перестройки в случаях динамичного изменения взаимного положения в пространстве пары оптико-электронных каналов (ОЭЖ).

Способы поиска стереосоответствий на основе построения адаптивной области поиска

Задача, на решение которой были направлены предлагаемые способы [8, 9] автоматического определения положения области поиска соответствий, заключалась в построении ограниченной с двух сторон и адаптивной по форме характеру дисторсии области поиска $Lin_{j+1,i}^P$ объекта P на изображении $j+1$ -го ОЭЖ при условии обеспечения возможности быстрой ее перестройки в случаях динамичного изменения взаимного положения в пространстве ОЭЖ с известными и неизвестными внутренними параметрами.

Для СТЗ с известными параметрами может быть применен следующий способ определения положения области поиска $Lin_{j+1,i}^P$ объекта P на изображении $j+1$ -го ОЭЖ (рис. 5).

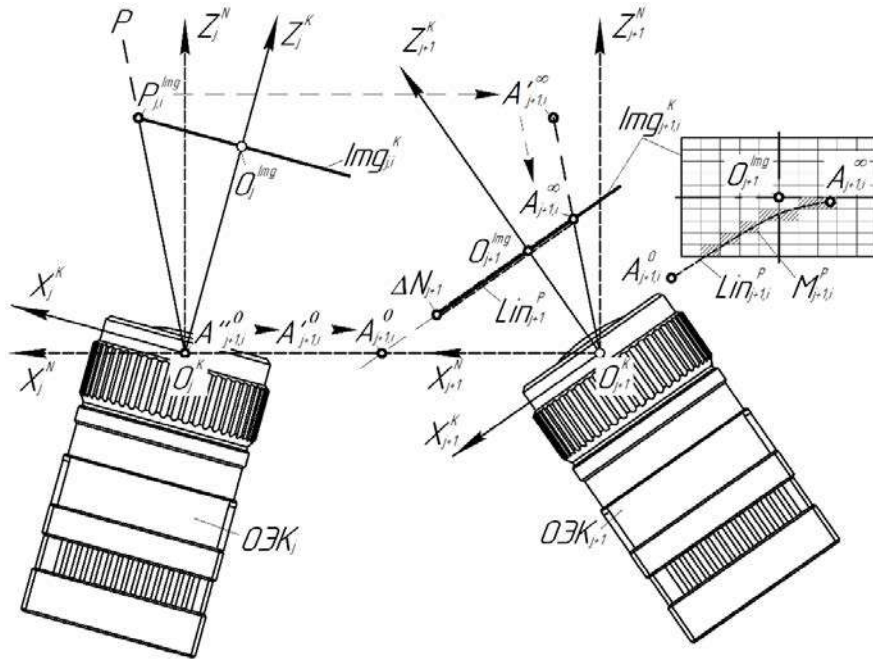


Рис. 5. Нахождение границ линии поиска соответствий на изображениях разных и произвольно расположенных ОЗК

В частности, должны быть определены (заданы) следующие данные:

- указано местоположение изображения $P_{j,i}^{img}$ объекта P на i -м кадре изображения $Img_{j,i}^K$ j -го ОЗК, и записан вектор $\mathbf{P}_{j,i}^{img} = (n_{j,i}^p \quad m_{j,i}^p \quad 1 \quad 1)$;
- вычислены матрицы взаимной ориентации $\mathbf{C}_{j,i}^N$ и $\mathbf{C}_{j+1,i}^N$;
- определены матрицы $\mathbf{C}_{j,i}^W$ и $\mathbf{C}_{j+1,i}^W$ положения ОЗК во внешней системе координат (СК);
- записаны матрицы внутренних параметров \mathbf{K}_j и \mathbf{K}_{j+1} .

В СК $O_{j+1}^K X_{j+1}^K Y_{j+1}^K Z_{j+1}^K$ j -го ОЗК ближайшая граница линии поиска описывается вектором $\mathbf{A}_{j+1,i}^0 = (x_{j+1,i}^0 \quad y_{j+1,i}^0 \quad f_{j+1} \quad 1)$, дальняя – вектором $\mathbf{A}_{j+1,i}^\infty = (x_{j+1,i}^\infty \quad y_{j+1,i}^\infty \quad f_{j+1} \quad 1)$, где $x_{j+1,i}^\infty$, $y_{j+1,i}^\infty$ и $x_{j+1,i}^0$, $y_{j+1,i}^0$ – пиксельные координаты дальней и ближней границ линии поиска $Lin_{j+1,i}^P$ на изображении $Img_{j+1,i}^K$.

Вычисление векторов $\mathbf{A}_{j+1,i}^0$ и $\mathbf{A}_{j+1,i}^\infty$ осуществляется следующим образом.

Для вычисления вектора $\mathbf{A}_{j+1,i}^\infty$ вектор $\mathbf{P}_{j,i}^{img}$ из пиксельной СК должен быть преобразован в параллельную метрическую СК $O_j^K X_j^K Y_j^K Z_j^K$ j -го ОЗК, а затем из допущения нахождения объекта P на бесконечном удалении сначала перенесен в параллельную метрическую СК $O_{j+1}^K X_{j+1}^K Y_{j+1}^K Z_{j+1}^K$ $j+1$ -го ОЗК, а затем в действительную СК $O_{j+1}^K X_{j+1}^K Y_{j+1}^K Z_{j+1}^K$. В результате будет найден вектор $\mathbf{A}_{j+1,i}^\infty$ с трехмерными координатами удаленной границы с учетом:

$$\mathbf{A}_{j+1,i}^\infty = \mathbf{P}_{j,i}^{img} \mathbf{K}_j \mathbf{D}_j \mathbf{C}_j^N (\mathbf{C}_{j+1,i}^N)^{-1} = (x_{j+1,i}^\infty \quad y_{j+1,i}^\infty \quad z_{j+1,i}^\infty \quad 1), \quad (1)$$

$$\text{где } \mathbf{K}_j = \begin{pmatrix} -p_j^x & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -p_j^y & 0 & 0 \\ 0,5p_j^x(N_j - 1) & 0,5p_j^y(M_j - 1) & f_j & 0 \\ \Delta O_j^x & \Delta O_j^y & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ – матрица внутренних параметров } j\text{-го ОЗК;}$$

N_j, M_j – значения горизонтальных и вертикальных разрешений фотоприемного устройства (ФПУ);

$\Delta O_j^X, \Delta O_j^Y$ – расстояние между геометрическим центром ФПУ и центром изображения Img_j^K ; p_j^X, p_j^Y – физические размеры пикселя ФПУ; θ_j – величина угла перекося изображений Img_j^K , возникающего, как правило, из-за погрешностей изготовления ФПУ, а также при неточной синхронизации процесса пиксельной выборки в процессе формирования изображения; f_j – фокусное расстояние объектива j -го ОЭК; $\mathbf{D}_j = \begin{pmatrix} d_j^R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_j^R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d_j^X & d_j^Y & 0 & 0 \end{pmatrix}$ – матрица коррекции дисторсии, где d_j^R – коэффициент коррекции радиальной дисторсии объектива j -го ОЭК; d_j^X – коэффициент коррекции тангенциальной дисторсии j -го ОЭК в горизонтальной плоскости; d_j^Y – коэффициент коррекции тангенциальной дисторсии в вертикальной плоскости; $\mathbf{B}_j = \text{diag}(b_j, b_j, b_j, 1)$ – проекционная матрица, где $b_j = z_j^P f_j^{-1}$ – проекционные коэффициенты; $\mathbf{C}_j^W = \left(\begin{array}{c|c} \mathbf{R}_j^W & \mathbf{0}_3^T \\ \hline \mathbf{T}_j^W & 1 \end{array} \right)$ – матрица переноса, содержащая информацию о пространственном положении и ориентации СК j -го ОЭК во внешней СК W ; \mathbf{R}_j^W – матрица вращения, определяющая ориентацию СК j -го ОЭК относительно внешней СК W ; $\mathbf{T}_j^W = (x_j^W \ y_j^W \ z_j^W)$ – вектор переноса, содержащий координаты начала СК j -го ОЭК относительно внешней СК W ; $\mathbf{P}_W = (x_W^P \ y_W^P \ z_W^P \ 1)$ – вектор трехмерных координат объекта P в СК W ; $\mathbf{C}_j^N = \left(\begin{array}{c|c} \mathbf{R}_j^N & \mathbf{0}_3^T \\ \hline \mathbf{0}_3 & 1 \end{array} \right)$ – матрицы взаимной ориентации ОЭК относительно их параллельного размещения в пространстве.

Операция масштабирования позволяет вычислить вектор $\mathbf{A}_{j+1,i}^\infty$ с координатами удаленной границы линии поиска в плоскости изображения $\text{Img}_{j+1,i}^K$

$$\mathbf{A}_{j+1,i}^\infty = \left(x_{j+1,i}' \frac{f_{j+1}}{z_{j+1,i}'} \quad y_{j+1,i}' \frac{f_{j+1}}{z_{j+1,i}'} \quad z_{j+1,i}' \frac{f_{j+1}}{z_{j+1,i}'} \quad 1 \right) = (x_{j+1,i}^\infty \quad y_{j+1,i}^\infty \quad f_{j+1} \quad 1). \quad (2)$$

Процесс вычисления координат ближайшей границы линии поиска строился на предположении о нулевом минимально возможном удалении объекта P от j -го ОЭК, чему будет соответствовать начало его СК. Соответственно, для параллельных СК $O_j^K X_j^N Y_j^N Z_j^N$ и $O_{j+1}^K X_{j+1}^N Y_{j+1}^N Z_{j+1}^N$ может быть записан вектор $\mathbf{A}_{j+1,i}^{n0}$ с трехмерными координатами оптического центра O_j^K объектива j -го ОЭК в СК $O_{j+1}^K X_{j+1}^N Y_{j+1}^N Z_{j+1}^N$:

$$\mathbf{A}_{j+1,i}^{n0} = \left(\left| \mathbf{C}_j^{WT(4)} - \mathbf{C}_{j+1}^{WT(4)} \right| \quad 0 \quad 0 \quad 1 \right). \quad (3)$$

Исходя из этого вычислялся вектор $\mathbf{A}_{j+1,i}^{r0}$ с трехмерными координатами начала координат СК $O_j^K X_j^K Y_j^K Z_j^K$ в СК $O_{j+1}^K X_{j+1}^K Y_{j+1}^K Z_{j+1}^K$:

$$\mathbf{A}_{j+1,i}^{r0} = \mathbf{A}_{j+1,i}^{n0} (\mathbf{C}_{j+1}^N)^{-1} = (x_{j+1,i}^{r0} \quad y_{j+1,i}^{r0} \quad z_{j+1,i}^{r0} \quad 1). \quad (4)$$

Нахождение метрических координат ближайшей границы линии поиска осуществлялось аналогично удаленной границе путем масштабирования, в результате вычислялся вектор $\mathbf{A}_{j+1,i}^0$:

$$\mathbf{A}_{j+1,i}^0 = \left(x_{j+1,i}^{r0} \frac{f_{j+1}}{z_{j+1,i}^{r0}} \quad y_{j+1,i}^{r0} \frac{f_{j+1}}{z_{j+1,i}^{r0}} \quad z_{j+1,i}^{r0} \frac{f_{j+1}}{z_{j+1,i}^{r0}} \quad 1 \right) = (x_{j+1,i}^0 \quad y_{j+1,i}^0 \quad f_{j+1} \quad 1). \quad (5)$$

Найденные координаты ближней и дальней границ позволили описать уравнение прямой для линии поиска:

$$y_{j+1,i}^L = f(x_{j+1,i}^L) = x_{j+1,i}^L \frac{y_{j+1,i}^0 - y_{j+1,i}^\infty}{x_{j+1,i}^0 - x_{j+1,i}^\infty} - x_{j+1,i}^\infty \frac{y_{j+1,i}^0 - y_{j+1,i}^\infty}{x_{j+1,i}^0 - x_{j+1,i}^\infty} + y_{j+1,i}^\infty. \quad (6)$$

Далее задается ряд $x_{j+1,i,h}^L$:

$$x_{j+1,i,h}^L = \{x_{j+1,i}^0; x_{j+1,i}^0 + p_j^X; x_{j+1,i}^0 + 2p_j^X; \dots, x_{j+1,i,h}^L = x_{j+1,i}^\infty\}, \quad (7)$$

состоящий из h чисел, определяющих значения горизонтальных координат $x_{j+1,i}^L$ в пределах найденных ограничений, т.е. от $\mathbf{A}_{j+1,i}^0$ до $\mathbf{A}_{j+1,i}^\infty$. При этом если координаты векторов $\mathbf{A}_{j+1,i}^0$ и/или $\mathbf{A}_{j+1,i}^\infty$ вышли за границы изображения $\text{Img}_{j+1,i}^K$, то левое $x_{j+1,i}^0$ и/или правое $x_{j+1,i}^\infty$ значения границ заменялись на $\pm \Delta N_{j+1} = 0,5 p_{j+1}^X (N_{j+1} - 1)$ соответственно. Если интервал между ограничениями в горизонтальной плоскости будет меньше соответствующего интервала в вертикальной плоскости, т.е. $|x_{j+1,i}^0 - x_{j+1,i}^\infty| < |y_{j+1,i}^0 - y_{j+1,i}^\infty|$, то ряд (7) задавался в пределах вертикальных ограничений, т.е.

$$y_{j+1,i,h}^L = \{y_{j+1,i}^0; y_{j+1,i}^0 + p_j^Y; y_{j+1,i}^0 + 2p_j^Y; \dots, y_{j+1,i,h}^L = y_{j+1,i}^\infty\}. \quad (8)$$

При этом также выполнялась проверка на нахождение границ в вертикальных границах изображения $\text{Img}_{j+1,i}^K$ с соответствующей их заменой на $\pm \Delta M_{j+1} = 0,5 p_{j+1}^Y (M_{j+1} - 1)$ при необходимости, а уравнение (6) записывалось в виде $x_{j+1,i}^L = f(y_{j+1,i}^L)$.

С использованием выражения (6) по значениям ряда (7) находились соответствующие координаты $y_{j+1,i,h}^L$. Или если был задан ряд (8), то по преобразованному уравнению $x_{j+1,i}^L = f(y_{j+1,i}^L)$ находились значения $x_{j+1,i,h}^L$. Из полученных координат формировался массив $\mathbf{A}_{j+1,i}^L$

$$\mathbf{A}_{j+1,i}^L = \begin{pmatrix} x_{j+1,i,1}^L & y_{j+1,i,1}^L & f_{j+1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{j+1,i,h}^L & y_{j+1,i,h}^L & f_{j+1} & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Далее массив $\mathbf{A}_{j+1,i}^L$ преобразовывался из метрической в пиксельную СК с учетом дисторсионных искажений объектива $j+1$ -го ОЭК, в результате вычислялся массив поиска $\mathbf{M}_{j+1,i}^P$:

$$\left[(\mathbf{M}_{j+1,i}^P)^{T(h)} \right]^T = \left[(\mathbf{A}_{j+1,i}^L)^{T(h)} \right]^T \mathbf{D}_{j+1}^{-1} \mathbf{K}_{j+1}^{-1} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T = (n_{j+1,i,h}^L \quad m_{j+1,i,h}^L). \quad (10)$$

В результате такого преобразования $\mathbf{M}_{j+1,i}^P$ принимает следующий вид:

$$\mathbf{M}_{j+1,i}^P = \begin{pmatrix} n_{j+1,i,1}^L & m_{j+1,i,1}^L \\ \vdots & \vdots \\ n_{j+1,i,h}^L & m_{j+1,i,h}^L \end{pmatrix}. \quad (11)$$

То есть каждая строка матрицы $\mathbf{A}_{j+1,i}^L$ подвергалась сначала дисторсионному преобразованию с помощью обратной матрицы \mathbf{D}_{j+1}^{-1} , а затем ее значения преобразовывались в пиксельную СК. При этом обратная матрица \mathbf{D}_{j+1}^{-1} должна быть найдена для каждой строки массива $\mathbf{A}_{j+1,i}^L$ с учетом применения коэффициентов дисторсионных искажений, полученных путем обратных преобразований коэффициентов коррекции, соответственно, радиальной и тангенциальной дисторсии. Например, если для

искажения использовать только один коэффициент дисторсии k_1^{j+1} , что на практике в большинстве случаев будет достаточно, то обратный коэффициент $d_{j+1,i,h}^R^{-1}$ может быть получен следующим образом:

$$d_{j+1,i,h}^R^{-1} = \frac{1}{1 + k_1^{j+1} (r'_{j+1,i,h})^2}, \quad (12)$$

где $r_{j+1,i,h} = \sqrt{(x_{j+1,i,h}^L)^2 + (y_{j+1,i,h}^L)^2}$;

$$r'_{j+1,i,h} = \left[\frac{\sqrt{(r_{j+1,i,h})^2 \pm \frac{4}{27k_1^{j+1}} + r_{j+1,i,h}}}{\pm 2k_1^{j+1}} \right]^{\frac{1}{3}} \pm 3k_1^{j+1} \left[\frac{\sqrt{(r_{j+1,i,h})^2 \pm \frac{4}{27k_1^{j+1}} + r_{j+1,i,h}}}{\pm 2k_1^{j+1}} \right]^{-\frac{1}{3}}.$$

Нахождение обратных коэффициентов коррекции дисторсии является достаточно сложным и ответственным этапом в подобных преобразованиях. Особенно при учете более сложных форм дисторсии, описываемых двумя и более коэффициентами радиальной и тангенциальной дисторсий. Однако применение такого подхода позволяет рассчитывать положение адаптивных к дисторсии линий поиска $\text{Lin}_{j+1,i}^P$ и соответствующих им массивов $\mathbf{M}_{j+1,i}^P$, не прибегая к попиксельной переработке изображений, а это, в свою очередь, значительно сократит количество проводимых операций и снизит требования к ЭВМ. Необходимо заметить и то, что в тех случаях, когда дисторсионные искажения велики, на этапе преобразования может понадобиться проведение аппроксимации значений искаженной дисторсией области $\text{Lin}_{j+1,i}^P$ и перерасчет значений матрицы $\mathbf{M}_{j+1,i}^P$ путем задания нового ряда значений $x_{j+1,i,h}^L$ по функции аппроксимированной кривой. Связано это с возникающими разрывами в значениях $\mathbf{M}_{j+1,i}^P$, из-за чего найденные пиксельные координаты будут на изображении ОЭК носить прерывистый характер.

В тех случаях, когда внутренние параметры применяемых ОЭК неизвестны, может быть применен способ определения границ и положения адаптивной области поиска, основанный на проецировании линии ожидаемого положения объекта P на изображение $j+1$ -го ОЭК. Еще одной особенностью данного способа является возможность дополнительного ограничения области поиска $\text{Lin}_{j+1,i}^P$ за счет введения минимальной z_j^{MIN} и максимальной z_j^{MAX} дальностей измерений.

Сущность разработанного способа иллюстрируется схемой, представленной на рис. 6. После обнаружения объекта P на i -м кадре изображения j -го ОЭК в ручном или автоматическом режимах задаются пиксельные координаты $n_{j,i}^P$ и $m_{j,i}^P$ его изображения $P_{j,i}^{\text{img}}$, на основании чего согласно полиномиальной модели вычисляется вектор $\mathbf{A}_{j,i}^{\text{img}} = (x_j^{\text{img}} \ y_j^{\text{img}} \ 1 \ 1)$ трехмерных координат изображения $P_{j,i}^{\text{img}}$ в СК $O_j^K X_j^K Y_j^K Z_j^K$.

$$\mathbf{A}_j^{\text{img}} = \left(\text{tg} \left[f(n_j^{P'}) \right] \ \text{tg} \left[f(m_j^{P'}) \right] \ 1 \ 1 \right) = (x_j^{\text{img}} \ y_j^{\text{img}} \ z_j^{\text{img}} \ 1), \quad (13)$$

где $f(n_j^{P'}) = c_0 + c_1(n_j^{P'}) + \dots + c_q(n_j^{P'})^q$, $f(m_j^{P'}) = d_0 + d_1(m_j^{P'}) + \dots + d_q(m_j^{P'})^q$ – полиномы прямого преобразования, описывающие взаимосвязь пиксельных координат изображения объекта в кадре с действующим значением углов в вертикальной и горизонтальной плоскостях на этот объект относительно оптической оси объектива ОЭК; $n_j^{P'} = n_j^P - 0,5N_j$, $m_j^{P'} = m_j^P - 0,5M_j$ – приведенные пиксельные координаты изображения объекта P в кадре j -го ОЭК; N_j , M_j – действующее горизонтальное и вертикальное разрешение изображения j -го ОЭК; $c_0, c_1, c_2, \dots, c_q$ и $d_0, d_1, d_2, \dots, d_q$ – полиномиальные коэффициенты прямого преобразования функций $f(n_j^{P'})$ и $f(m_j^{P'})$ соответственно.

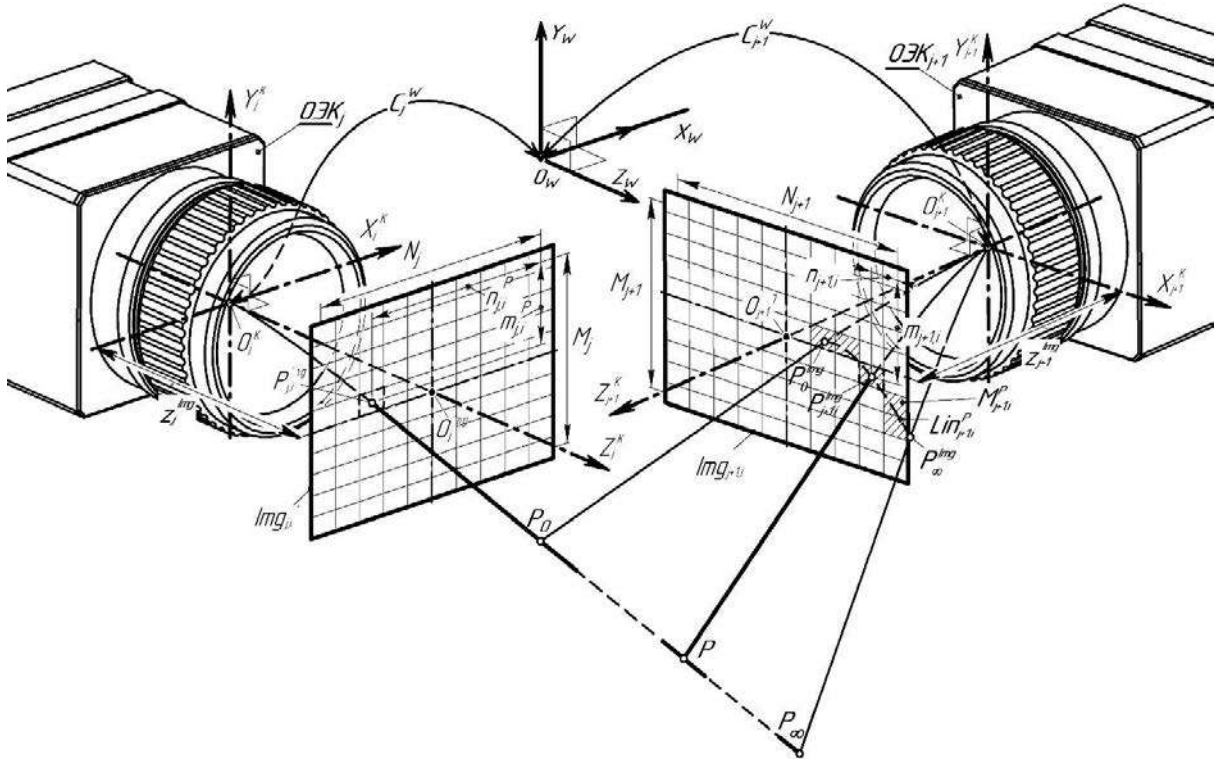


Рис. 6. Иллюстрация способа определения области поиска на основе проецирования линии визирования объекта

Расстояние от z_j^{MIN} до z_j^{MAX} разбивается на h интервалов и вычисляется шаг q_h одного интервала согласно выражению

$$q_h = (z_j^{\text{MAX}} - z_j^{\text{MIN}})h^{-1}. \quad (14)$$

Далее вычисляется матрица $M_{j,i}$ возможных положений объекта P в СК $O_j^K X_j^K Y_j^K Z_j^K$ камеры j -го ОЭК:

$$M_{j,i} = \begin{pmatrix} x_{j,i}^{\text{Img}} z_j^{\text{MIN}} & y_{j,i}^{\text{Img}} z_j^{\text{MIN}} & z_j^{\text{MIN}} & 1 \\ x_{j,i}^{\text{Img}} (z_j^{\text{MIN}} + q_1) & y_{j,i}^{\text{Img}} (z_j^{\text{MIN}} + q_1) & z_j^{\text{MIN}} + q_1 & 1 \\ x_{j,i}^{\text{Img}} (z_j^{\text{MIN}} + 2q_2) & y_{j,i}^{\text{Img}} (z_j^{\text{MIN}} + 2q_2) & z_j^{\text{MIN}} + 2q_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{j,i}^{\text{Img}} (z_j^{\text{MIN}} + (h-1)q_{h-1}) & y_{j,i}^{\text{Img}} (z_j^{\text{MIN}} + (h-1)q_{h-1}) & z_j^{\text{MIN}} + (h-1)q_{h-1} & 1 \\ x_{j,i}^{\text{MAX}} & y_{j,i}^{\text{MAX}} & z_j^{\text{MIN}} & 1 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

С учетом пространственного положения ОЭК, а именно по матрицам C_j^W и C_{j+1}^W вычисляется матрица $M_{j+1,i}$ положений объекта P в СК $O_{j+1}^K X_{j+1}^K Y_{j+1}^K Z_{j+1}^K$ камеры $j+1$ -го ОЭК:

$$M_{j+1,i} = M_{j,i} C_j^W (C_{j+1}^W)^{-1} = \begin{pmatrix} x_{j+1,i,0} & y_{j+1,i,0} & z_{j+1,i,0} & 1 \\ x_{j+1,i,1} & y_{j+1,i,1} & z_{j+1,i,1} & 1 \\ x_{j+1,i,2} & y_{j+1,i,2} & z_{j+1,i,2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{j+1,i,h-1} & y_{j+1,i,h-1} & z_{j+1,i,h-1} & 1 \\ x_{j+1,i,h} & y_{j+1,i,h} & z_{j+1,i,h} & 1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Далее матрица $\mathbf{M}_{j+1,i}$ проецируется на плоскость изображения $\text{Img}_{j+1,i}^K$, для чего с учетом значений матрицы $\mathbf{M}_{j+1,i}$ вычисляется матрица $\mathbf{M}_{j+1,i}^{\text{Img}}$:

$$\mathbf{M}_{j+1,i}^{\text{Img}} = \begin{pmatrix} x_{j+1,i,0} (z_{j+1,i,0})^{-1} & y_{j+1,i,0} (z_{j+1,i,0})^{-1} & 1 & 1 \\ x_{j+1,i,1} (z_{j+1,i,1})^{-1} & y_{j+1,i,1} (z_{j+1,i,1})^{-1} & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{j+1,i,h-1} (z_{j+1,i,h-1})^{-1} & y_{j+1,i,h-1} (z_{j+1,i,h-1})^{-1} & 1 & 1 \\ x_{j+1,i,h} (z_{j+1,i,h})^{-1} & y_{j+1,i,h} (z_{j+1,i,h})^{-1} & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{j+1,i,0}^{\text{Img}} & y_{j+1,i,0}^{\text{Img}} & 1 & 1 \\ x_{j+1,i,1}^{\text{Img}} & y_{j+1,i,1}^{\text{Img}} & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{j+1,i,h-1}^{\text{Img}} & y_{j+1,i,h-1}^{\text{Img}} & 1 & 1 \\ x_{j+1,i,h}^{\text{Img}} & y_{j+1,i,h}^{\text{Img}} & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

где вектор $(\mathbf{M}_{j+1,i}^{\text{Img}})^{T(0)} = (x_{j+1,i,0}^{\text{Img}} \quad y_{j+1,i,0}^{\text{Img}} \quad 1 \quad 1)$ определяет положение ближней границы P_0^{Img} , а вектор $(\mathbf{M}_{j+1,i}^{\text{Img}})^{T(h)} = (x_{j+1,i,h}^{\text{Img}} \quad y_{j+1,i,h}^{\text{Img}} \quad 1 \quad 1)$ положение дальней границы P_∞^{Img} области поиска $\text{Lin}_{j+1,i}^P$ на изображении $\text{Img}_{j+1,i}^K$ (см. рис. 6).

Если $|x_{j+1,i,0}^{\text{Img}} - x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}| \geq |y_{j+1,i,0}^{\text{Img}} - y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}|$, то осуществляется аппроксимация значений первого и второго столбцов матрицы $\mathbf{M}_{j+1,i}^{\text{Img}}$ полиномом $f(x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}) = y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}$ g -го порядка

$$f(x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}) = a_0 + a_1(x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}) + a_2(x_{j+1,i,h}^{\text{Img}})^2 + \dots + a_{g-1}(x_{j+1,i,h}^{\text{Img}})^{g-1} + a_g(x_{j+1,i,h}^{\text{Img}})^g = y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}, \quad (18)$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots, a_g$ – полиномиальные коэффициенты функции $f(x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}) = y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}$.

Если $|x_{j+1,i,0}^{\text{Img}} - x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}| < |y_{j+1,i,0}^{\text{Img}} - y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}|$, то аппроксимируются значения первого и второго столбцов матрицы $\mathbf{M}_{j+1,i}^{\text{Img}}$ полиномом $f(y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}) = x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}$

$$f(y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}) = b_0 + b_1(y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}) + b_2(y_{j+1,i,h}^{\text{Img}})^2 + \dots + b_{g-1}(y_{j+1,i,h}^{\text{Img}})^{g-1} + b_g(y_{j+1,i,h}^{\text{Img}})^g = x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}, \quad (19)$$

где $b_0, b_1, b_2, \dots, b_g$ – полиномиальные коэффициенты функции $f(y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}) = x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}$.

Далее предусмотрено вычисление пиксельных координат ближней P_0^{Img} и дальней P_∞^{Img} границ области поиска $\text{Lin}_{j+1,i}^P$ в виде векторов:

$$\mathbf{P}_0^{\text{Img}} = \begin{pmatrix} f(\arctg[x_{j+1,i,0}^{\text{Img}}]) + 0,5N_{j+1} \\ f(\arctg[y_{j+1,i,0}^{\text{Img}}]) + 0,5M_{j+1} \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} n_{j+1,i,0} \\ m_{j+1,i,0} \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}^T; \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_\infty^{\text{Img}} = \begin{pmatrix} f(\arctg[x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}]) + 0,5N_{j+1} \\ f(\arctg[y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}]) + 0,5M_{j+1} \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} n_{j+1,i,h} \\ m_{j+1,i,h} \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}^T. \quad (21)$$

Для полинома $f(x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}) = y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}$ генерируется ряд $L_n = \{n_{j+1,i,0}; n_{j+1,i,1}; n_{j+1,i,2}; \dots; n_{j+1,i,h-1}; n_{j+1,i,h}\}$ номеров столбцов от $n_{j+1,i,0}$ до $n_{j+1,i,h}$ шагом в один пиксель, при этом если $n_{j+1,i,0} \leq 0$, то $n_{j+1,i,0}$ принимается равным нулю, если $n_{j+1,i,0} \geq (N_{j+1} - 1)$, то $n_{j+1,i,0}$ принимается равным $N_{j+1} - 1$.

После этого для значений ряда L_n вычисляется ряд:

$$L_\alpha = \{\alpha_{j+1,i,0}; \alpha_{j+1,i,1}; \alpha_{j+1,i,2}; \dots \alpha_{j+1,i,h-1}; \alpha_{j+1,i,h}\}. \quad (22)$$

Далее на основаниях значений L_∞ рассчитывается ряд L_x :

$$L_x = \{\text{tg}[\alpha_{j+1,i,0}]; \text{tg}[\alpha_{j+1,i,1}]; \dots \text{tg}[\alpha_{j+1,i,h-1}]; \text{tg}[\alpha_{j+1,i,h}]\} = \{x_{j+1,i,0}, x_{j+1,i,1}, \dots x_{j+1,i,h-1}, x_{j+1,i,h}\}. \quad (23)$$

Значения ряда L_x подставляются в выражение (21), при этом вычисленные значения $y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}$ записываются в ряд L_y :

$$L_y = \{y_{j+1,i,0}^{\text{Img}}; y_{j+1,i,1}^{\text{Img}}; y_{j+1,i,2}^{\text{Img}}; \dots y_{j+1,i,h-1}^{\text{Img}}; y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}\}. \quad (24)$$

Значения ряда L_y подставляются в ряд L_m в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} L_m &= \{\arctg[y_{j+1,i,0}^{\text{Img}}] + 0,5M_{j+1}; \dots \arctg[y_{j+1,i,h-1}^{\text{Img}}] + 0,5M_{j+1}, \arctg[y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}] + 0,5M_{j+1}\} = \\ &= \{m_{j+1,i,0}, \dots m_{j+1,i,h-1}, m_{j+1,i,h}\}. \end{aligned} \quad (25)$$

Если ранее был получен полином $f(y_{j+1,i,h}^{\text{Img}}) = x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}$, то генерируется ряд $L_m = \{m_{j+1,i,0}; m_{j+1,i,1}; m_{j+1,i,2}; \dots m_{j+1,i,h-1}; m_{j+1,i,h}\}$ номеров строк от $m_{j+1,i,0}$ до $m_{j+1,i,h}$, при этом если $m_{j+1,i,0} \leq 0$, то $m_{j+1,i,0}$ принимается равным нулю, если $m_{j+1,i,0} \geq (M_{j+1} - 1)$, то $m_{j+1,i,0}$ принимают равным $M_{j+1} - 1$.

Для значений ряда L_m вычисляется ряд L_β :

$$L_\beta = \{\beta_{j+1,i,0}; \beta_{j+1,i,1}; \beta_{j+1,i,2}; \dots \beta_{j+1,i,h-1}; \beta_{j+1,i,h}\}. \quad (26)$$

На основаниях значений L_β вычисляется ряд L_y :

$$L_y = \{\text{tg}[\beta_{j+1,i,0}]; \text{tg}[\beta_{j+1,i,1}]; \dots \text{tg}[\beta_{j+1,i,h-1}]; \text{tg}[\beta_{j+1,i,h}]\} = \{y_{j+1,i,0}; y_{j+1,i,1}; \dots y_{j+1,i,h-1}; y_{j+1,i,h}\}. \quad (27)$$

Значения ряда L_y подставляются в выражение (23), при этом вычисленные значения $x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}$ записывают в ряд L_x :

$$L_x = \{x_{j+1,i,0}^{\text{Img}}; x_{j+1,i,1}^{\text{Img}}; x_{j+1,i,2}^{\text{Img}}; \dots x_{j+1,i,h-1}^{\text{Img}}; x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}\}. \quad (28)$$

Значения ряда L_x преобразуются в ряд L_n согласно выражению

$$\begin{aligned} L_n &= \{\arctg[x_{j+1,i,0}^{\text{Img}}] + 0,5N_{j+1}; \dots \arctg[x_{j+1,i,h-1}^{\text{Img}}] + 0,5N_{j+1}; \arctg[x_{j+1,i,h}^{\text{Img}}] + 0,5N_{j+1}\} = \\ &= \{n_{j+1,i,0}; \dots n_{j+1,i,h-1}; n_{j+1,i,h}\}. \end{aligned} \quad (29)$$

На заключительном этапе после вычисления рядов L_n и L_m из их значений формируют массив поиска

$$\mathbf{M}_{j+1,i}^p = ([L_n] \ [L_m]) = \begin{pmatrix} [n_{j+1,i,0}] & [n_{j+1,i,1}] & \dots & [n_{j+1,i,h-1}] & [n_{j+1,i,h}] \\ [m_{j+1,i,0}] & [m_{j+1,i,1}] & \dots & [m_{j+1,i,h-1}] & [m_{j+1,i,h}] \end{pmatrix}^T \quad (30)$$

с округленными до ближайшего целого значениями пиксельных координат $n_{j+1,i,h}$ и $m_{j+1,i,h}$, в своей совокупности определяющими положение дополнительно ограниченной с двух сторон и

адаптированной по форме к дисторсионным искажениям объектива области поиска $\text{Lin}_{j+1,i}^P$ на i -м кадре изображения $\text{Img}_{j+1,i}^K$ $j + 1$ -го ОЭК.

Заключение

Таким образом, задача автоматического построения адаптивной области поиска соответствий полностью решена.

Особенность предлагаемых способов построения адаптивной области изображений объектов на стереопаре заключается в сниженных требованиях к ЭВМ за счет осуществления пошаговых операций. Данные способы не требуют предварительного нахождения соответствий на изображениях, вычисления фундаментальной матрицы и решения сложных систем уравнений с множеством неизвестных. Это, в свою очередь, определяет возможность динамичного перерасчета положения области поиска на изображениях при изменении координат, ориентации ОЭК в пространстве и изменении фокусного расстояния их объективов в процессе съемки.

Список литературы

1. Зубарь А. В., Сидоренко А. А., Щербо А. Н., Тишин С. А. Анализ способов поиска соответствий на изображениях для маломощных систем технического зрения // Национальные приоритеты России. Наука и военная безопасность. 2017. № 4. С. 5–12.
2. Пьянков Д. И. Пространственная обработка несинхронизированных видеопоследовательностей на основе ректификации кадров // Программные продукты и системы. 2013. № 1. С. 61–66.
3. Гошин Е. В. Модель реконструкции 3D-сцен с учетом эпиполярных ограничений // Молодой ученый. 2014. № 12. С. 71–73. URL: <https://moluch.ru/archive/71/12174/> (дата обращения: 10.01.2020).
4. Вахимов А. Т., Гуревич Л. С., Павленко Д. В. Обзор алгоритмов стереозрения // Стохастическая оптимизация в информатике / под ред. О. Н. Граничина. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2008. Вып. 4. С. 151–167.
5. Крыловецкий А. А., Протасов С. И. Алгоритмы анализа изображений в системах стереозрения реального времени // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. 2010. С. 9–18.
6. Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П., Перетягин Г. И. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. 168 с.
7. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход: пер. с англ. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
8. Fursov V., Goshin Ye. Conformed Identification of the Fundamental Matrix in the Problem of a Scene Reconstruction, using Stereo Images // Image Mining. Theory and Applications: proceedings of IMTA-4 2013. 2013. P. 29–37.
9. Зубарь А. В., Пивоваров В. П. Дополнительные ограничения при поиске изображений на стереопарах вдоль эпиполярных линий // Омский научный вестник. 2018. № 2. С. 124–128.
10. Пат. 2740435 РФ, МПК G06T 7/246. Способ определения положения области поиска соответствий на дисторсионно-искаженных изображениях / Зубарь А. В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Зубарь А. В. № 2020108613; заявл. 27.02.2020; опубл. 14.01.21, Бюл. № 2.
11. Годунов А. И., Лобачев А. В. Оценка возможности применения адаптивных алгоритмов в автоматизированных системах управления // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 4. С. 41–47.
12. Пафииков Е. А., Годунов А. И., Юрков Н. К., Николаев О. В. Алгоритмы адаптивного обнаружения сигнала, отраженного от малоразмерных наземных целей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 32–43.
13. Волотов Е. М., Волотова Т. А., Митрофанов И. В., Митрофанов Е. И. Модель погрешности определения параметров траектории при использовании системы регистрации на базе видеокамер общего назначения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 29–37. doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-4
14. Коршунов Г. И. Моделирование физических сред для оптимизации цифрового управления в киберфизических системах // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 23–28. doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-3

References

1. Zubar' A.V., Sidorenko A.A., Shcherbo A.N., Tishin S.A. Analysis of ways to find correspondences in images for low-power vision systems. *Natsional'nye priorityety Rossii. Nauka i voennaya bezopasnost' = National priorities of Russia. Science and military security.* 2017;(4):5–12. (In Russ.)
2. P'yankov D.I. Spatial processing of unsynchronized video sequences based on frame rectification. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems.* 2013;(1):61–66. (In Russ.)

3. Goshin E.V. Model of reconstruction of 3D scenes taking into account epipolar constraints. *Molodoy uchenyy = Young scientist*. 2014;(12):71–73. (In Russ.). Available at: <https://moluch.ru/archive/71/12174/> (accessed 10.01.2020).
4. Vakhimov A.T., Gurevich L.S., Pavlenko D.V. Overview of stereovision algorithms. *Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike = Stochastic optimization in computer science*. Saint Petersburg: Izd-vo S.-Peterburg. un-ta, 2008;(4):151–167. (In Russ.)
5. Krylovetskiy A.A., Protasov S.I. Algorithms for image analysis in real-time stereo vision systems. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Sistemyy analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University. Ser.: System analysis and information technologies*. 2010:9–18. (In Russ.)
6. Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Peretyagin G.I. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh: ucheb. posobie = Digital image processing in information systems : textbook*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2000:168. (In Russ.)
7. Forsayt D.A., Pons Zh. *Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podkhod: per. s angl. = Computer vision. A modern approach : translated from English*. Moscow: Vil'yams, 2004:928. (In Russ.)
8. Fursov V., Goshin Ye. Conformed Identification of the Fundamental Matrix in the Problem of a Scene Reconstruction, using Stereo Images. *Image Mining. Theory and Applications: proceedings of IMTA-4*. 2013;2013:29–37.
9. Zubar' A.V., Pivovarov V.P. Additional restrictions when searching for images on stereo pairs along epipolar lines. *Omskiy nauchnyy vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2018;(2):124–128. (In Russ.)
10. Patent 2740435 Russian Federation, MPK G06T 7/246. A method for determining the position of the correspondence search area on distorted images. Zubar' A.V. et al.; applicant and patent holder Zubar A.V. No. 2020108613; appl. 27.02.2020; publ. 14.01.21, Bull. № 2. (In Russ.)
11. Godunov A.I., Lobachev A.V. Assessment of the possibility of using adaptive algorithms in automated control systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(4):41–47. (In Russ.)
12. Pafikov E.A., Godunov A.I., Yurkov N.K., Nikolaev O.V. Algorithms for adaptive detection of a signal reflected from small-sized ground targets. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):32–43. (In Russ.)
13. Volotov E.M., Volotova T.A., Mitrofanov I.V., Mitrofanov E.I. Model of error in determining trajectory parameters when using a registration system based on general-purpose video cameras. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):29–37. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-4
14. Korshunov G.I. Modeling of physical environments for optimizing digital control in cyberphysical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):23–28. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-3

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Владимирович Зубарь

кандидат технических наук, доцент кафедры наземных радиотехнических средств, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе (Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: alexey_zubar@mail.ru

Олег Владимирович Духанов

кандидат технических наук, преподаватель кафедры стрелкового оружия, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе (Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: duhanov3@gmail.com

Алексей Александрович Громов

курсовой офицер – преподаватель факультета ракетно-артиллерийского вооружения,

Aleksey V. Zubar

Candidate of technical sciences, associate professor of the sub-department of ground radio engineering, Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza (Military Town, Penza, Russia)

Oleg V. Dukhanov

Candidate of technical sciences, teacher of the sub-department of small arms, Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza (Military Town, Penza, Russia)

Aleksey A. Gromov

Course officer – teacher at the faculty of missile and artillery weapons,

Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе (Россия, г. Пенза, Военный городок)

E-mail: darkzgrom@gmail.com

Александр Юрьевич Тычков

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

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

Aleksandr Yu. Tychkov

Doctor of technical sciences, associate professor, head of the sub-department of radio engineering and electronic systems, Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 11.10.2023

Поступила после рецензирования/Revised 17.10.2023

Принята к публикации/Accepted 15.11.2023

ПОСТРОЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Ю. В. Федюкин¹, Е. И. Минаков², И. Е. Агуреев³, Н. И. Хазов⁴, В. М. Чайковский⁵

^{1, 2, 3, 4} Тульский государственный университет, Тула, Россия

⁵ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ aakhromeshin@yandex.ru, ² EMinakov@bk.ru, ³ agureev-igor@yandex.ru, ⁴ nikita.hazov511@yandex.ru, ⁵ rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* 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 способности, безопасности дорожного движения, уровня загруженности улично-дорожной сети и обслуживания дорожного движения. *Материалы и методы.* Сформулирована обобщенная математическая модель интеллектуальной транспортной системы, содержащая процесс управления в общем виде; представлены варианты и методика решения задачи определения эффективности внедрения интеллектуальной транспортной системы. Расширено описание модели процесса управления и интенсивностью операций для возможности рассматривать задачи равновесия транспортных систем с учетом функционирования информационных систем автомобильного транспорта. *Результаты и выводы.* Таким образом, сформулирована математическая модель эффективности интеллектуальных транспортных систем, которая позволяет выполнить постановку и решение задачи об изменении распределения элементов транспортной системы по подмножествам состояний за счет внедрения инструментальных подсистем интеллектуальных транспортных систем.

Ключевые слова: транспортная система, интеллектуальная транспортная система, математическая модель, транспортный процесс, эффективность интеллектуальной транспортной системы

Для цитирования: Федюкин Ю. В., Минаков Е. И., Агуреев И. Е., Хазов Н. И., Чайковский В. М. Построение и применение модели эффективности интеллектуальной транспортной системы // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 77–87. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-7

ON THE ISSUE OF DEVELOPING A MODEL OF A TRANSPORT SYSTEM OF INDIVIDUAL MOVEMENTS WITH MANAGEMENT

Yu.V. Fedyukin¹, E.I. Minakov², I.E. Agureev³, N.I. Khazov⁴, V.M. Chaykovskiy⁵

^{1, 2, 3, 4} Tula State University, Tula, Russia

⁵ Penza State University, Penza, Russia

¹ aakhromeshin@yandex.ru, ² EMinakov@bk.ru, ³ agureev-igor@yandex.ru, ⁴ nikita.hazov511@yandex.ru, ⁵ rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The topic of evaluating the effectiveness of intelligent transport systems is relevant and important today. It exerts control effects on the transport system of the city (agglomeration) and ensures the achievement of the necessary level of indicators in terms of capacity, road safety, traffic congestion and traffic maintenance. *Materials and methods.* A generalized mathematical model of an intellectual transport system is formulated, containing the management process in a general form; The variants and methods of solving the problem of determining the effectiveness of the implementation of an intelligent transport system are presented. The description of the model of the management process and the intensity of operations has been expanded to allow considering the tasks of balancing transport systems, taking into account the functioning of information systems of motor transport. *Results and conclusions.* Thus, a mathematical model of the efficiency of intelligent transport systems has been formulated, which allows us to formulate and solve the problem of changing the distribution of elements of a transport system across subsets of states through the introduction of instrumental subsystems of intelligent transport systems.

Keywords: transport system, intelligent transport system, mathematical model, transport process, efficiency of intelligent transport system

For citation: Fedyukin Yu.V., Minakov E.I., Agureev I.E., Khazov N.I., Chaykovskiy V.M. On the issue of developing a model of a transport system of individual movements with management. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):77–87. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-7

Введение

В последнее время набирает популярность тема оценки эффективности интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Известно несколько ключевых публикаций, в которых выполнены следующие исследования:

- 1) определен термин эффективности ИТС [1–7];
- 2) разработаны подходы к классификации методов оценки эффективности ИТС [8–10];
- 3) выполнены эксперименты и натурные обследования по теме эффективности ИТС [1, 11–14];
- 4) определены частные методы решения задач об эффективности ИТС [15–18];
- 5) разработаны подходы к построению теории ИТС [19–21].

Интеллектуальная транспортная система в рамках современных представлений – это сложный комплекс модулей, подсистем, периферийного оборудования, оснащенных программным обеспечением (с использованием искусственного интеллекта), который оказывает управляющие воздействия на транспортную систему города (агломерации) и обеспечивает достижение необходимого уровня индикаторов в части пропускной способности, безопасности дорожного движения, уровня загруженности улично-дорожной сети и обслуживания дорожного движения.

Реализованная модель эффективности ИТС может рассматриваться в двух пространственно-временных аспектах:

- 1) локальный транспортный процесс множества участников дорожного движения на отдельном участке улично-дорожной сети с течением короткого, ограниченного интервала времени; при этом имеет значение фактор конкуренции отдельных транспортных процессов участников дорожного движения;
- 2) нелокальные (макроскопические) эффекты функционирования транспортной системы, которые складываются из множества локальных транспортных процессов.

ИТС, таким образом, определяется управлением набором транспортных процессов, совершенных последовательно, с использованием транспортных средств различных видов транспорта. Множество транспортных процессов отдельных индивидов составляет картину транспортной подвижности всей транспортной системы. Учитывая циклический характер транспортных процессов (или циклический характер функционирования ТС), можно модель эффективности интеллектуальной транспортной системы представить в виде схемы (рис. 1).

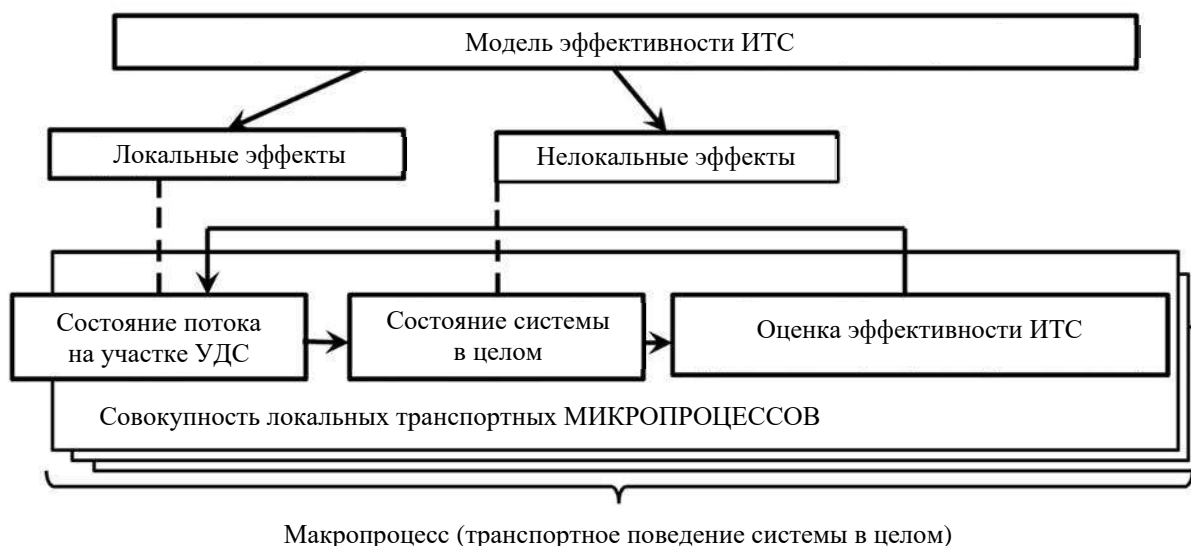


Рис. 1. Применение теории макросистем для оценки эффективности ИТС

На основании выводов, которые можно сделать из анализа источников, можно поставить вопрос о том, каким образом можно определять эффективность тех или иных мероприятий при внедрении подсистем ИТС. Для ответа на данный вопрос предполагается использование гипотезы о нелокальном характере эффективности ИТС.

Эта гипотеза звучит так: внедрение инструментальных подсистем ИТС, устанавливаемых на территории городских и/или агломерационных транспортных систем, приводит к множеству локальных изменений в движении транспортных средств. При этом на отдельных участках УДС показатели транспортного потока и уровня обслуживания дорожного движения могут меняться как в положительном, так и в отрицательном направлении. Общая эффективность ИТС может быть определена для транспортной системы в целом и имеет нелокальный характер.

Формулировка гипотезы в таком виде позволяет построить следующий научный подход при построении модели эффективности ИТС:

1) считается, что каждая инструментальная подсистема ИТС соответствует определенному множеству элементов транспортной системы и изменяет их поведение;

2) нелокальный характер оценки эффективности позволяет использовать известный научный подход – теорию транспортных макросистем;

3) тогда появляется возможность для каждой инструментальной подсистемы ИТС построить отдельную макроскопическую модель и рассчитать состояния равновесия (равновесные распределения элементов транспортной системы по состояниям) до и после внедрения мероприятий ИТС;

4) равновесные состояния транспортной макросистемы до и после внедрения мероприятий ИТС могут сравниваться между собой на уровне системы в целом и дать заключение по нескольким показателям: а) общий уровень обслуживания дорожного движения; б) степень загруженности УДС в целом; в) общий уровень расходования ресурсов в транспортной системе и др.

Отметим, что локальные транспортные микропроцессы (см. рис. 1) представляют собой множество стохастически действующих элементов, поведение которых трудно прогнозируется, а их взаимодействие может влиять на эффективность каждого из них в противоположных направлениях. Однако на уровне макросистемы в целом эффективность транспортной системы в целом может увеличиться. Таким образом, с помощью макроскопического моделирования можно выявить наиболее рациональный вариант внедрения ИТС с точки зрения повышения эффективности транспортной системы в целом.

Транспортная система, как известно, по своей природе является сложной, так как налицо все признаки сложности. Напомним определение сложных систем по А. И. Олемскому [25]: «особую актуальность приобрели исследования коллективного поведения, проявляющегося в самоорганизации физических, биологических, социальных и других систем. Благодаря тому что их поведение может изменяться непредсказуемым образом в зависимости от состояния их составляющих и внешних условий, такие системы получили название сложных».

Таким образом, разрабатываемые методики должны учитывать сложность транспортных систем именно в том смысле, как это трактуется в теории сложных систем.

Следует отметить, что в научной литературе немного результатов, касающихся количественных оценок эффективности ИТС, а используемые методы не имеют достаточной методологической основы. В настоящей работе предлагается и обосновывается возможность использования теории макросистем к оценке эффективности мероприятий ИТС.

Таким образом, основные направления дальнейших исследований могут быть следующие:

- разработка теоретического аппарата для описания эффективности ИТС;
- разработка математической модели интеллектуальной транспортной системы;
- построение численных алгоритмов решения задач оценки эффективности ИТС.

В настоящей работе поставлена цель – сформулировать обобщенную математическую модель эффективности ИТС, а также указать численную схему решения поставленных задач.

Материалы и методы

В одной из работ, касающихся моделирования транспортных макросистем [22–24], приведена математическая модель, которую мы здесь будем использовать для достижения поставленной в статье цели. Указанная модель построена на основе использования подходов теории макросистем и описывает транспортную систему, состоящую из элементов (в данном случае транспортных средств, которые могут находиться в различных состояниях, относящихся к выбранному подмножеству состояний, например, распределение по парковочному пространству или по участкам улично-дорожной сети (УДС)):

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}(t); \\ \mathbf{p} = \mathbf{p}(t); \\ \mathbf{q} = \mathbf{q}(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_k; \\ V(t) = \{V_1, \dots, V_\alpha, \dots, V_p : V_\alpha = \sum_{v=1}^{v_f} n_v(t) \mid v \in r_\alpha\}; \\ v = 1, \dots, v_f(t); \\ \pi_v = \pi_v(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{v_f}(t)\}; \\ G(t) = g_v \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(V^*(\Delta\tau_k)) = - \sum_{n=1}^m V_n \ln \frac{V_n}{a_n} - (G_n + V_n) \ln(G_n + V_n) \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (1)$$

где k – индекс (номер) интервала времени $\Delta\tau_k$; K – число временных интервалов $\Delta\tau_k$; $\tilde{\Gamma}$ – граф УДС; \mathbf{p} – матрица транспортных связей; \mathbf{q} – матрица действующих провозных (пропускных) способностей; t – непрерывное время; $V(t)$ – множество, каждый из элементов которого равен числу автомобилей (транспортных средств), находящихся в момент времени t на парковочной зоне или на маршруте α ; v – индекс автомобиля (его уникальный идентификатор); $v_f = N_\alpha$ – наибольший индекс автомобиля, соответствующий количеству транспортных средств в текущий момент времени; r – общее число парковочных зон или маршрутов (корреспонденций); n_v – булева переменная, которая определяется соотношением и равна 1, если ТС находится в зоне или на маршруте r_α , и 0 в противном случае; r_α – α -й маршрут (парковочная зона); π_v – уравнение транспортного процесса для v -го автомобиля, определяющее долю выполненного транспортного процесса (или соответствующей операции транспортного процесса, включая паркование); $\Pi(t)$ – множество, состоящее из отдельных уравнений транспортного процесса; β – индекс транспортного процесса; $G(t)$ – векторная функция расходования ресурса(-ов); g_v – вектор удельных расходов ресурса для каждого автомобиля; H – информационная энтропия транспортной системы; G^* – вектор ограничений на расход ресурсов; a_n – априорные вероятности нахождения элемента в состоянии n ; G_n – емкость состояния n ; n – порядковый номер состояния элементов; m – общее число различных состояний.

Представленная здесь модель транспортной системы оперирует с множеством уравнений транспортного процесса. Поскольку имеется переменная времени, но на каждом относительно малом интервале времени реализуется гипотеза о равновесии системы, то модель можно отнести к классу квазидинамических.

В итоге будем считать, что модель (1) образует замкнутую систему уравнений и неравенств с учетом неуказанных здесь вспомогательных соотношений. Тогда соотношения (1) образуют постановку задачи оптимизации транспортного процесса, если в качестве критерия оптимальности выбрать минимум расходования ресурсов.

Следует отметить, что в задаче (1) пока что недостаточно возможностей, чтобы описывать эффективность ИТС, поскольку данная постановка соответствует лишь квазидинамической задаче о равновесном распределении транспортных средств на сети (в парковочном пространстве). Расширим это представление за счет введения соотношений, позволяющих оценивать непосредственный результат внедрения инструментальных подсистем ИТС в рамках сформулированной выше гипотезы о нелокальном характере эффективности ИТС [26–28].

В качестве подмножеств состояний можно рассматривать отдельные виды транспорта (индивидуальный, каршеринг, такси, автобусы, ЛРТ, метро, трамвай, велосипеды и т.д.), а элементами будут индивиды, которые выбирают конкретную систему. Аналогично можно представить себе классифицированное множество парковочных зон, центров массового тяготения (ЦМТ), которые заполняются посетителями – теми же пассажирами, которые находятся в ЦМТ после совершения поездки и перед

началом новой поездки. Таких постановок задач можно сформулировать достаточно большое число, поэтому нам потребуется некоторая обобщенная математическая модель, которая была бы удобной для большинства таких постановок.

Отметим, что для предполагаемой модели необходимо ввести описания используемых ресурсов и условий их расходования по аналогии с зависимостями для транспортных процессов в системе (1). Традиционно в виде таких ресурсов используем время, материальные ресурсы, денежные средства и их различные виды.

Запишем обобщенную модель транспортной макросистемы для моделирования эффективности ИТС в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ \mathbf{q} = \mathbf{q}(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_k; \\ E(t) = \{E_1, \dots, E_\alpha, \dots, E_p : E_\alpha = \sum_{e=1}^{e_f} n_e(t) | e \in s_\alpha\}; \\ e = 1, \dots, e_f(t); \\ \pi_e = \pi_e(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{e_f}(t)\}; \\ G(t) = g_e \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(E^*(\Delta\tau_k)) = -\sum_{n=1}^m E_n \ln \frac{E_n}{a_n} - (G_n + E_n) \ln(G_n + E_n) \rightarrow \max. \end{array} \right. \quad (2)$$

В системе (2) замена количества автомобилей (V) на количество элементов e (или множества состояний S) подразумевает то, что обобщенная система может быть записана в виде частного случая, где каждому элементу e может быть поставлен в соответствие конкретный вид элемента:

$$e \in E = \{v; r; p; \dots\}; \quad (3)$$

$$s \in S = \{r; v; z; \dots\}, \quad (4)$$

где v – автомобиль; r – маршрут; p – пассажир (пешеход); z – парковочная зона.

Кроме этого, в систему (2) обозначено $\tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}(t)$ как множество состояний элементов. В частности, если $\tilde{\Sigma} = \tilde{\Gamma}$, то мы имеем граф УДС, состоящий из совокупности связей, каждая из которых заполняется элементами (транспортными средствами). В иной постановке $\tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}(t)$ может представлять собой одно из следующих множеств: совокупность парковочных зон; совокупность видов транспорта; множество целей поездок и т.д. Выражение $\rho = \rho(t)$ определяет теперь наличие связей между подмножествами состояний, определяющих возможные потоки, например, транспортно-пересадочные узлы (ТПУ) между различными видами транспортных систем и т.д. Соотношение $q = q(t)$ устанавливает пропускные способности, соответствующие интенсивностям обслуживания элементами подмножеств состояний (пропускная способность ТПУ, ЦМТ и т.д.).

На систему (2) накладывается требование, чтобы пары элементов, входящих в множества E и S , образовывали реалистичные постановки задач.

Приведенная формулировка модели эффективности ИТС может быть решена в рамках теории макросистем с помощью численных методов, позволяющих находить равновесные состояния систем, соответствующие максимуму энтропии в модели (2). Напомним, что выбор конкретного выражения для энтропии зависит от применяемой схемы заполнения состояний элементами [29, 30].

Рассмотрим вопрос численного решения описанной выше системы уравнений и неравенств.

Записанное условие равновесия в транспортной макросистеме

$$H(E^*(\Delta\tau_k)) = -\sum_{n=1}^m e_n \ln \frac{e_n}{a_n} - (G_n + e_n) \ln(G_n + e_n) \rightarrow \max \quad (5)$$

сопровождается максимизацией функции энтропии для распределенных по определенному правилу элементов на множестве состояний. Здесь обозначено: m – количество макросостояний (количество связей на рис. 2); e_n – количество элементов (например, транспортных средств), находящихся в состоянии n .

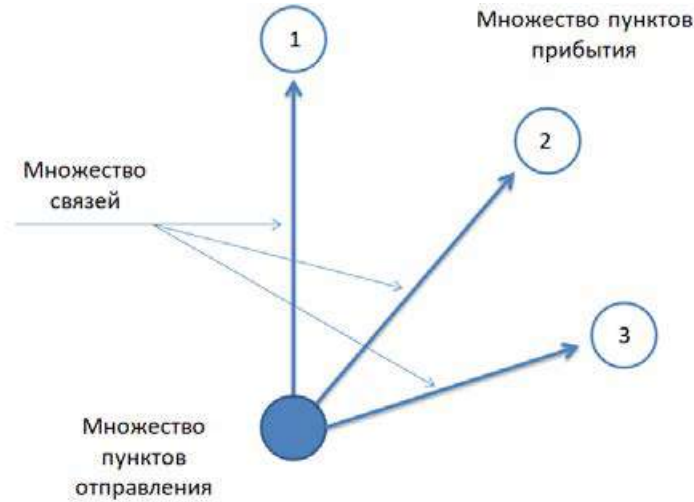


Рис. 2. Множество связей и пунктов отправлений

Количество неизвестных e_n равно m , что соответствует количеству состояний. Уравнения – нелинейные алгебраические.

Особенностью модели является то, что в ней в явном виде отсутствуют: 1) расщепление по виду транспорта; 2) расщепление по цели поездки, т.е. модель соответствует наиболее общему случаю.

Как множество связей, так и множество пунктов отправлений.

Рассмотрим выражение $\Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{e_j}(t)\}$, которое представляет собой вектор величин $\pi_\beta(t)$ – уравнений процесса для элемента с индексом $e = \beta$. Здесь $\pi_\beta(t)$ численно представляет собой долю выполненной работы к моменту времени $\tau = t$.

С точки зрения макроподхода мы не выделяем конкретный элемент, а можем получить распределение $\pi_i(t)$ для тех элементов, которые находятся в состоянии i в момент t .

Предположим, что в модели рассматривается частный случай:

- 1) цель поездки – работа;
- 2) вид транспорта – индивидуальный транспорт.

Тогда возникает необходимость в уравнении (1) задать емкости состояний G_1, G_2 и т.д.

Пусть емкость каждого состояния можно выразить отношением

$$G_i = \frac{L_i}{l_a}, \quad (6)$$

где i – произвольный номер состояния; L_i – длина связи i ; l_a – динамический габарит автомобиля (приведенного транспортного средства).

Рассмотрим способ расчета априорных вероятностей a_i .

Если $\sum_{i=1}^m D_i$ – общий объем прибытий, то

$$a_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^m D_i}. \quad (7)$$

Для решения задачи необходимо знать (задать) элементы вектора удельных расходов ресурса для конкретной группы (подмножества) автомобилей, находящихся на связи i .

Рассмотрим численную схему решения задачи о равновесии транспортной макросистемы, основанную на теории макросистем [18]. При этом будем считать, что расходование ресурсов является линейным и неполным, что является наиболее вероятным случаем в большинстве транспортных систем.

Тогда рассматривается следующая функция Лагранжа, для которой ставится задача поиска неизвестных множителей:

$$L(E, \lambda) = H(E) + \sum_{k=1}^r \lambda_k \left(1 - \sum_{n=1}^m \tilde{t}_{kn} E_n \right), \quad (8)$$

где E – общее число элементов в транспортной системе; λ_k – неопределенные множители Лагранжа, подлежащие определению; m – общее число подмножеств состояний в системе; r – общее число ресурсов (в частном случае $r=1$); $\tilde{t}_{kn} = t_{kn} / q_k$ – нормированный параметр линейного расходования ресурсов; q_k – запас k -го ресурса.

Согласно теории макросистем [18] условие существования стационарного состояния сводится к формулировке

$$\lambda_k^* \left(1 - \sum_{n=1}^m \tilde{t}_{kn} E_n^*(\lambda) \right) = 0, \quad (9)$$

$$1 - \sum_{n=1}^m \tilde{t}_{kn} E_n^*(\lambda) \geq 0, \lambda_k \geq 0, k \in \overline{1, r}, \quad (10)$$

которая может быть разрешена с помощью мультипликативного алгоритма:

$$\lambda_k^{s+1} = \lambda_k^s \left(1 - \gamma \nabla_{\lambda_k} \tilde{L}(\lambda^*) \right), k \in \overline{1, r}, \quad (11)$$

где

$$\tilde{L}(\lambda) = L(E^*(\lambda), \lambda). \quad (12)$$

В настоящей статье представление ресурсов g_e не конкретизируется. В принципе, это может быть любой из ресурсов, который расходуется при осуществлении поездок: время; денежные средства; стоимость транспортных средств; горюче-смазочные материалы и т.п.

Заключение

В настоящей работе сформулирована математическая модель эффективности ИТС, которая позволяет выполнить постановку и решение задачи об изменении распределения элементов транспортной системы по подмножествам состояний за счет внедрения инструментальных подсистем ИТС. Эта модель отличается традиционным подходом теории макросистем, в то же время она позволяет составлять множество постановок задач для самых разных ситуаций. Например, может представлять интерес задача о распределении пассажиров по различным типам транспортных систем, каждая из которых отличается своим набором потребительских свойств (задача о расщеплении по видам транспорта) и т.д.

Другим результатом данной работы является получение уравнений, необходимых для численной реализации конкретной задачи в модели (2).

Таким образом, дальнейшее направление работ могло бы здесь заключаться в формулировке конкретных постановок задач и их численной реализации.

Список литературы

1. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Подходы к формализации понятия транспортного поведения населения городских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 2. С. 60–70. doi: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.
2. Мулеев Е. Ю. Транспортное поведение населения России: краткий отчет о социологическом исследовании. М. : Институт экономики транспорта и транспортной политики НИУ ВШЭ, 2015. 37 с.
3. Савельева Е. О. Факторы формирования транспортного поведения в крупнейших городах России // Градостроительство. 2018. № 5. С. 54–63.
4. Федоров В. А. Транспортное поведение индивидуумов – основной источник городских транспортных проблем // Молодой ученый. 2015. № 18. С. 309–316. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=35781211&selid=35781220> (дата обращения: 05.10.2022).
5. Bhattacharya S., Kumar R. V. Modeling Tourists' Opinions Using RIDIT Analysis // IGI Global. 2017. URL: <https://www.igiglobal.com/chapter/modeling-tourists-opinions-using-ridit-analysis/170970> (дата обращения: 01.10.2022).
6. Privitera D. Towards a Competitive Sustainable City: Cycling as an Opportunity // Handbook of Research on Sustainable Development and Economics. IGI Global, 2015. P. 20–36.
7. Wang Y., Zeng Z. Data-Driven Solutions to Transportation Problems. 1st ed. Elsevier Inc., 2019. 299 p.
8. Бутузова А. Б., Потылицын Е. А. Современные методы исследования транспортной подвижности населения на основе данных мобильных операторов // Молодой ученый. 2019. № 50. С. 87–90. URL: <https://moluch.ru/archive/288/65157/> (дата обращения: 05.10.2022).
9. Савельева Е. О., Лоренс П. Сравнительный анализ моделей городской мобильности в России и за рубежом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 3. С. 79–94. doi: 10.15593/2409-5125/2019.03.06
10. Комаров В., Акимова В. Стратегии устойчивой мобильности: лучшие мировые практики // Экономическая политика. 2021. Т. 16, № 1. С. 82–103. doi: 10.18288/1994-5124-2021-1-82-103
11. Блянкинштейн И. М., Фадеев А. И., Федоров А. В. [и др.] Обоснование целесообразности изучения транспортной подвижности населения на основе мониторинга абонентов мобильной связи // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии. 2015. Т. 8, № 2. С. 254–263.
12. Тиньков С. А. Подходы к оценке транспортной доступности точек притяжения в мегаполисе // Экология промышленного производства. 2021. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-otsenke-transportnoy-dostupnosti-tochek-prityazheniya-v-megapolise> (дата обращения: 10.09.2022).
13. Madhuwanthi R. A. M., Marasinghe A., Janaka Rajapakse R. P. C. [et al.]. Factors Influencing to Travel Behavior on Transport Mode Choice // International Journal of Affective Engineering. 2015. Vol. 15. doi: 10.5057/ijae.IJAE-D-15-00044
14. Liang Q., Weng J., Zhou W. [et al.]. Individual Travel Behavior Modeling of Public Transport Passenger Based on Graph Construction. 2018. doi: 10.1155/2018/3859830
15. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Обзор сервисов для обеспечения транспортной подвижности населения // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике : сб. науч. ст. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. (г. Курск, 29 апреля 2022 г.) / отв. ред. М. С. Разумов. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 22–27.
16. Головин О. К., Пупынин К. В. Повышение эффективности использования аппаратных ресурсов браузерными программными средствами моделирования транспортного потока // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2019) : тр. Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. С. А. Прохорова [и др.]. Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2019. С. 433–434.
17. Khabibullina E., Sysoev A. Forming production rules in intelligent transportation system to control traffic flow // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2020. № 4. С. 317–322.
18. Кузяшев А. Н., Черных А. А. Концепция умного городского транспорта // Экономика и бизнес: теория и практика. 2020. № 12-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-umnogo-gorodskogo-transporta> (дата обращения: 26.09.2022).
19. Крушель Е. Г., Огар Т. П., Панфилов А. Э. [и др.]. Оценка пригодности модели перемещения пассажиров между остановками городского пассажирского общественного транспорта для выявления скрытых закономерностей поведения пассажиропотока // Инженерный вестник Дона. 2021. № 4. URL: ivdon.ru/rubric/magazine/archive/n4y2021/6936
20. Пищикова О. В. Механизм управления транспортным поведением жителей мегаполиса // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 1. doi: 10.23670/IRJ.2022.115.1.113. URL: <https://research-journal.org/archive/1-115-2022-january/mexanizm-upravleniya-transportnym-povedeniem-zhitelej-megapolisa> (дата обращения: 06.10.2022).
21. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Information support of transport mobility of the population // Information Innovative Technologies : International Scientific-Practical Conference (Prague, 25–29 April 2022). Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2022. P. 342–349.
22. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Математическая модель транспортного поведения на основе теории транспортных макросистем // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 6. С. 13–18. doi: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-2

23. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Модельное представление транспортной системы города (агломерации) с позиций теории макросистем // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2021) : сб. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Курск, 20 ноября 2021 года / отв. ред. Е. В. Агеев. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 20–23.
24. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Транспортное поведение населения с позиций феноменологической теории самоорганизации сложных систем // Современные материалы, техника и технология : сб. науч. ст. 11-й Междунар. науч.-практ. конф. (г. Курск, 30 декабря 2021 г.). Курск : Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 13–18.
25. Олемской А. И. Синергетика сложных систем: феноменология и статистическая теория. М. : Кранд, 2009. 379 с.
26. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Обоснование выбора теоретического аппарата для описания транспортного поведения жителей города (мегаполиса) // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18, № 6. С. 746–758. doi: 10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758
27. Попков Ю. С. Теория макросистем: Равновесные модели. М. : Эдиториал УРСС, 1999. 320 с.
28. Хакен Г. Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам : пер. с англ. / предисл. Ю. Л. Климонтовича. Изд. 3-е, испр. и доп. М. : УРСС: ЛЕНАРД, 2014. 320 с.
29. Пафилов Е. А., Годунов А. И., Юрков Н. К., Николаев О. В. Алгоритмы адаптивного обнаружения сигнала, отраженного от малоразмерных наземных целей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 32–43. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-4
30. Вологов Е. М., Вологова Т. А., Митрофанов И. В., Митрофанов Е. И. Модель погрешности определения параметров траектории при использовании системы регистрации на базе видеочамер общего назначения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 29–37. doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-4

References

1. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Approaches to the formalization of the concept of transport behavior of the population of urban agglomerations. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Intelligence. Innovation. Investment*. 2021;(2):60–70. (In Russ.). doi: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.
2. Muleev E.Yu. *Transportnoe povedenie naseleniya Rossii: kratkiy otchet o sotsiologicheskoy issledovaniy = Transport behavior of the Russian population: a brief report on a sociological study*. Moscow: Institut ekonomiki transporta i transportnoy politiki NIU VShE, 2015:37. (In Russ.)
3. Savel'eva E.O. Factors of formation of transport behavior in the largest cities of Russia. *Gradostroitel'stvo = Urban planning*. 2018;(5):54–63. (In Russ.)
4. Fedorov V.A. Transport behavior of individuals – the main source of urban transport problems. *Molodoy uchenyy = Young scientist*. 2015;(18):309–316. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=35781211&selid=35781220> (accessed 05.10.2022).
5. Bhattacharya S., Kumar R.V. Modeling Tourists' Opinions Using RIDIT Analysis. *IGI Global*. 2017. Available at: <https://www.igi-global.com/chapter/modeling-tourists-opinions-using-ridit-analysis/170970> (accessed 01.10.2022).
6. Privitera D. Towards a Competitive Sustainable City: Cycling as an Opportunity. *Handbook of Research on Sustainable Development and Economics*. IGI Global, 2015:20–36.
7. Wang Y., Zeng Z. *Data-Driven Solutions to Transportation Problems*. 1st ed. Elsevier Inc., 2019:299.
8. Butuzova A.B., Potylitsyn E.A. Modern methods of studying the transport mobility of the population based on data from mobile operators. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2019;(50):87–90. (In Russ.). Available at: <https://moluch.ru/archive/288/65157/> (accessed 05.10.2022).
9. Savel'eva E.O., Lorens P. Comparative analysis of urban mobility models in Russia and abroad. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanistics*. 2019;(3):79–94. (In Russ.). doi: 10.15593/2409-5125/2019.03.06
10. Komarov V., Akimova V. Strategies for sustainable mobility: world's best practices. *Ekonomicheskaya politika = Economic policy*. 2021;16(1):82–103. (In Russ.). (In Russ.). doi: 10.18288/1994-5124-2021-1-82-103
11. Blyankinshteyn I.M., Fadeev A.I., Fedorov A.V. et al. Substantiation of the expediency of studying the transport mobility of the population based on monitoring of mobile subscribers. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser.: Tekhnika i tekhnologii = Journal of the Siberian Federal University. Ser.: Technique and Technology*. 2015;8(2):254–263. (In Russ.)
12. Tin'kov S.A. Approaches to assessing the transport accessibility of points of attraction in a megalopolis. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva = Ecology of industrial production*. 2021;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-otsenke-transportnoy-dostupnosti-tochek-prityazheniya-v-megalopolise> (accessed 10.09.2022).
13. Madhuwanthi R.A.M., Marasinghe A., Janaka Rajapakse R.P.C. et al. Factors Influencing to Travel Behavior on Transport Mode Choice. *International Journal of Affective Engineering*. 2015;15. doi: 10.5057/ijae.IJAE-D-15-00044

14. Liang Q., Weng J., Zhou W. et al. *Individual Travel Behavior Modeling of Public Transport Passenger Based on Graph Construction*. 2018. doi: 10.1155/2018/3859830
15. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Overview of services for ensuring transport mobility of the population. *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii, avtomatizatsii i mekhatronike: sb. nauch. st. 4-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Kursk, 29 aprelya 2022 g.) = Information technologies in management, automation and mechatronics: collection of scientific articles of the 4th International scientific and technical conf. (Kursk, April 29, 2022)*. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2022:22–27. (In Russ.)
16. Golovnin O.K., Pupylin K.V. Improving the efficiency of using hardware resources by browser-based software for modeling traffic flow. *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii (PIT 2019): tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Promising Information Technologies (PIT 2019): proceedings of the International scientific and technical conf.* Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2019:433–434. (In Russ.)
17. Khabibullina E., Sysoev A. Forming production rules in intelligent transportation system to control traffic flow. *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh system = Open semantic technologies for designing intelligent systems*. 2020;(4):317–322.
18. Kuzyashev A.N., Chernykh A.A. The concept of smart urban transport. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika = Economics and Business: theory and practice*. 2020;(12-2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-umnogo-gorodskogo-transporta> (accessed 26.09.2022).
19. Krushel' E.G., Ogar T.P., Panfilov A.E. et al. Assessment of the suitability of the model of passenger movement between stops of urban passenger public transport to identify hidden patterns of passenger traffic behavior. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2021;(4). (In Russ.). Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2021/6936
20. Pishchikova O.V. The mechanism of managing the transport behavior of megalopolis residents. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2022;(1). (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2022.115.1.113. Available at: <https://research-journal.org/archive/1-115-2022-january/mexanizm-upravleniya-transportnym-povedeniem-zhitelej-megapolisa> (accessed 06.10.2022).
21. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Information support of transport mobility of the population. *Information Innovative Technologies: International Scientific-Practical Conference (Prague, 25–29 April 2022)*. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2022:342–349.
22. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Mathematical model of transport behavior based on the theory of transport macrosystems. *Mir transporta = The world of transport*. 2021;19(6):13–18. (In Russ.). doi: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-2
23. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Model representation of the city's transport system (agglomeration) from the standpoint of the theory of macrosystems. *Sovremennye avtomobil'nye materialy i tekhnologii (SAMIT-2021): sb. st. XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Kursk, 20 noyabrya 2021 goda) = Modern automotive materials and technologies (SAMIT-2021): collection of Articles XIII International scientific and technical conf. (Kursk, November 20, 2021)*. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2021:20–23. (In Russ.)
24. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Transport behavior of the population from the standpoint of the phenomenological theory of self-organization of complex systems. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: sb. nauch. st. 11-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Kursk, 30 dekabrya 2021 g.) = Modern materials, equipment and technology: collection of scientific articles of the 11th International scientific and practical conf. (Kursk, December 30, 2021)*. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2021:13–18. (In Russ.)
25. Olemskoy A.I. *Sinergetika slozhnykh sistem: fenomenologiya i statisticheskaya teoriya = Synergetics of complex systems: phenomenology and statistical theory*. Moscow: Krasand, 2009:379. (In Russ.)
26. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Substantiation of the choice of a theoretical apparatus for describing the transport behavior of residents of a city (megapolis). *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2021;18(6):746–758. (In Russ.). doi: 10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758
27. Popkov Yu.S. *Teoriya makrosistem: Ravnovesnye modeli = Theory of macrosystems: Equilibrium models*. Moscow: Editorial URSS, 1999:320. (In Russ.)
28. Khaken G. *Informatsiya i samoorganizatsiya: makroskopicheskiy podkhod k slozhnym sistemam: per. s angl. = Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems: translated from English*. 3rd edition, corr. and add. Moscow: URSS: LENARD, 2014:320. (In Russ.)
29. Pafikov E.A., Godunov A.I., Yurkov N.K., Nikolaev O.V. Algorithms for adaptive detection of a signal reflected from small-sized ground targets. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2)32–43. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-4
30. Volotov E.M., Volotova T.A., Mitrofanov I.V., Mitrofanov E.I. Model of the error in determining trajectory parameters when using a registration system based on general-purpose video cameras. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):29–37. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-4

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Владимирович Федюкин

| Yuri V. Fedyukin

кандидат технических наук, докторант,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)
E-mail: aakhromeshin@yandex.ru

Евгений Иванович Минаков

доктор технических наук,
профессор кафедры радиоэлектроники,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)
E-mail: EMinakov@bk.ru

Игорь Евгеньевич Агуреев

доктор технических наук, профессор кафедры
транспортно-технологических машин и процессов,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)
E-mail: agureev-igor@yandex.ru

Никита Ильич Хазов

аспирант,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)
E-mail: nikita.hazov511@yandex.ru

Виктор Михайлович Чайковский

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Candidate of technical sciences, doctoral student,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Evgeniy I. Minakov

Doctor of technical sciences, professor
of the sub-department of radioelectronics,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Igor E. Agureev

Doctor of technical sciences, professor
of the sub-department of transport
and technological machines and processes,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Nikita I. Khazov

Postgraduate student,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Viktor M. Chaykovskiy

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio engineering and radioelectronic systems,
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 08.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2023

Принята к публикации/Accepted 25.10.2023

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ В ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Е. А. Пафиков¹, А. В. Петешов², А. С. Ишков³

¹ Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия
² Военный университет радиоэлектроники, Череповец, Россия
³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ evgeniyapafikov@mail.ru, ² peteshov76@mail.ru, ³ asihkov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* 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. *Материалы и методы.* Предлагается рассмотреть алгоритм оптимального обнаружения в поляриметрической радиолокационной системе, обеспечивающий лучшее среди множества других алгоритмов соотношение между качеством обнаружения и количеством требуемой для этого статистической информации. Провести исследования алгоритма обнаружения, связанного с использованием выбеливающего фильтра. Определить алгоритм оптимального обнаружения в поляриметрической радиолокационной системе и оценить его эффективность. *Результаты и выводы.* Таким образом, предложен алгоритм и на основе его обнаружитель с использованием поляриметрического выбеливающего фильтра, обеспечивающий почти такие же характеристики целей, как и оптимальный поляриметрический обнаружитель, и может обеспечить лучшее среди множества других алгоритмов соотношение между качеством обнаружения и количеством требуемой для этого статистической информации.

Ключевые слова: обнаружение, поляризация, фильтр, помеха, алгоритм

Для цитирования: Пафиков Е. А., Петешов А. В., Ишков А. С. Алгоритм оптимального обнаружения в поляриметрической радиолокационной системе // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 88–94. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-8

OPTIMAL DETECTION ALGORITHM IN A POLARIMETRIC RADAR SYSTEM

E.A. Pafikov¹, A.V. Peteshov², A.S. Ishkov³

¹ Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia
² Military University of Radio Electronics, Cherepovets, Russia
³ Penza State University, Penza, Russia
¹ evgeniyapafikov@mail.ru, ² peteshov76@mail.ru, ³ asihkov@mail.ru

Abstract. *Background.* In polarization radar systems with synthetic aperture (SAR), in comparison with conventional ones that use the emission and reception of signals of a fixed polarization, an additional emission channel and three additional reception channels are organized. This significantly increases the amount of information about radar objects and expands the possibilities for improving the quality of target detection. The optimal polarimetric detector is introduced for an ideal situation where the characteristics of the interference are completely known. Such an algorithm provides potentially achievable target detection performance against a background of interference. In the general formulation, the task of detecting a target against a background of noise is formulated as a task of testing statistical hypotheses about the presence or absence of a target based on the observed signal implementation. *Materials and methods.* The article proposes to consider an algorithm for optimal detection in a polarimetric radar system, which provides the best ratio among many other algorithms between the quality of detection and the amount of statistical information required for this. Conduct research on the detection algorithm associated with the use of a whitening filter. Determine the optimal

detection algorithm in a polarimetric radar system and evaluate its effectiveness. *Results and conclusions.* Thus, an algorithm has been proposed and, based on it, a detector using a polarimetric whitening filter (PWF), which provides almost the same target characteristics as an optimal polarimetric detector, and can provide the best ratio among many other algorithms between the quality of detection and the amount of statistical data required for this information.

Keywords: detection, polarization, filter, interference, algorithm

For citation: Pafikov E.A., Peteshov A.V., Ishkov A.S. Optimal detection algorithm in a polarimetric radar system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):88–94. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-8

Введение

Реализация потенциальных возможностей радиолокационной системы с синтезированной апертурой (РСА) в составе бортовых комплексов обуславливает необходимость совершенствования алгоритмов обработки информации для обнаружения и распознавания малоразмерных наземных объектов при наличии воздействующих помех, а также ночью и в условиях плохой видимости, когда другие средства разведки малоэффективны. Как известно из общей теории, оптимальный алгоритм принятия решения сводится к нахождению отношения правдоподобия и сравнению его с пороговым уровнем. Значение порогового уровня определяется выбранным критерием оптимальности. При обнаружении сигналов обычно используется критерий Неймана – Пирсона, применение которого обеспечивает максимальную вероятность правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги.

Алгоритм оптимального обнаружения в поляриметрической радиолокационной системе

Рассмотрим обнаружение стабильной цели на фоне отражений от земной поверхности. Будем полагать, что помеховый векторный сигнал является гауссовым с плотностью вероятности (1)

$$w(\mathbf{X}_t) = \frac{1}{\pi^3 |\mathbf{K}_t|} \exp(-\mathbf{X}_t^\dagger \mathbf{K}_t^{-1} \mathbf{X}_t). \quad (1)$$

Параметры ковариационной матрицы помехи \mathbf{K}_c , как и параметры векторного сигнала \mathbf{X}_t , отраженного целью, считаем полностью известными. Функции правдоподобия наблюдаемого векторного сигнала, который обозначим вектором \mathbf{Y} , при гипотезах о наличии и отсутствии цели являются гауссовыми с ковариационной матрицей \mathbf{K}_c , но различными средними значениями, и для логарифма отношения правдоподобия получаем следующее выражение:

$$\ln L = \operatorname{Re}\{\mathbf{Y}^\dagger \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{X}_t\} - \mathbf{X}_t^\dagger \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{X}_t / 2 = \zeta - d^2 / 2, \quad (2)$$

где

$$\zeta = \operatorname{Re}\{\mathbf{Y}^\dagger \mathbf{K}^{-1} \mathbf{X}_t\} \quad (3)$$

– достаточная статистика, определяющая оптимальный алгоритм обработки входного сигнала \mathbf{Y} , а величина

$$d^2 = \mathbf{X}_t^\dagger \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{X}_t \quad (4)$$

представляет собой обобщенное отношение сигнал-помеха, или параметр обнаружения.

Оптимальный по критерию Неймана – Пирсона алгоритм обнаружения формулируется следующим образом: принимается решение о наличии цели, если $\zeta \geq \zeta_0$, и решение об отсутствии цели в противном случае. При этом величина порога ζ_0 определяется заданной вероятностью ложной тревоги. Таким образом, оптимальный поляризационный обнаружитель стабильной цели состоит из устройства оптимальной обработки входного векторного сигнала \mathbf{Y} , проводимой в соответствии с выражением (3), и порогового устройства.

Рассчитаем рабочие характеристики оптимального обнаружителя. Так как достаточная статистика (3) при отсутствии и наличии сигнала представляет собой линейную комбинацию гауссовских случайных величин и, следовательно, распределена по гауссовскому закону, то вероятности правильного обнаружения D и ложной тревоги F легко вычисляются аналитически, и для них получаем следующие выражения:

$$D = 0,5 + 0,5\Psi\left(\frac{\xi_0 - d^2}{d}\right), \quad F = 0,5 - 0,5\Psi\left(\frac{\xi_0}{d}\right), \quad (5)$$

где $\Psi(u)$ – интеграл вероятности.

Полученные соотношения были использованы для расчета характеристик обнаружения различных типов стабильных целей на фоне отражений от земной поверхности. В качестве целей рассматривались двугранный и трехгранный уголкового отражатели, для которых вид матриц рассеяния и векторных отраженных сигналов приведены в предыдущем разделе, а также цель в виде длинного тонкого провода, ориентированного в плоскости наблюдения под углом $\theta = 45^\circ$. В линейном поляризованном базисе матрица рассеяния такой цели имеет вид

$$\mathbf{S}_e = c \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

а векторный отраженный сигнал записывается в виде

$$\mathbf{X}_e = c \begin{pmatrix} 1 & \sqrt{2} & 1 \end{pmatrix}^T. \quad (7)$$

Ковариационная матрица отражений от земной поверхности принята в виде выражения

$$\mathbf{K}_c = \sigma_{hbc} \begin{pmatrix} 1 & 0 & \sqrt{\gamma_c} \rho_{13c} \\ 0 & 2\varepsilon_c & 0 \\ \sqrt{\gamma_c} \rho_{13c} & 0 & \gamma_c \end{pmatrix} \text{ со значениями параметров } \sigma_{hbc} = 0,107; \varepsilon_c = 0,34; \gamma_c = 1; \rho_{13c} = 0,33 [1].$$

Результаты расчетов характеристик обнаружения для вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$ приведены на рис. 1.

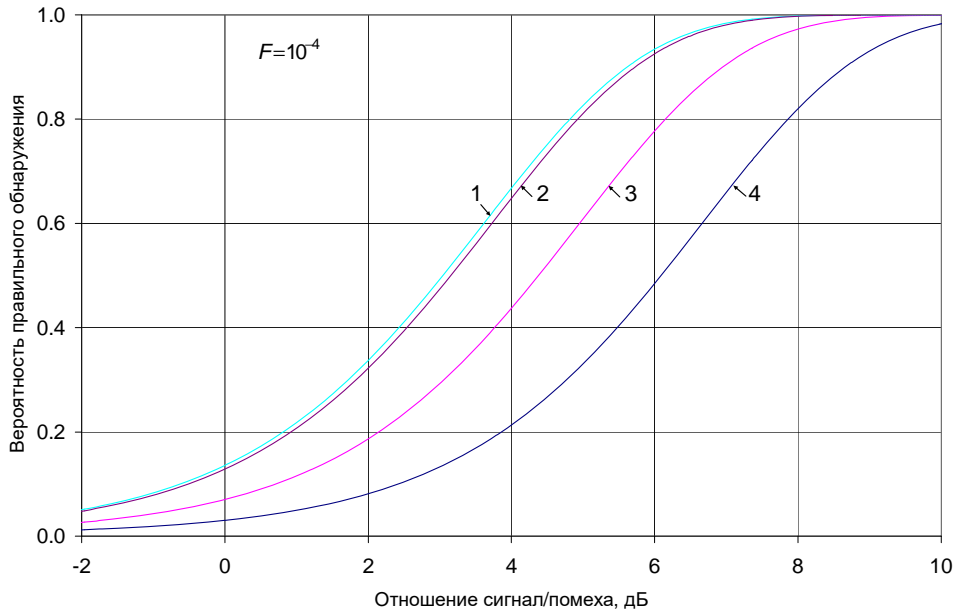


Рис. 1. Характеристики обнаружения стабильной цели на фоне земной поверхности:
 1 – двугранный уголкового отражатель ($\theta = 0^\circ$); 2 – двугранный уголкового отражатель ($\theta = 45^\circ$);
 3 – длинный провод ($\theta = 45^\circ$); 4 – трехгранный уголкового отражатель

Представленные кривые обнаружения позволяют определить значения порогового отношения сигнал-помеха на входе приемного устройства поляризационной радиолокационной станции (РЛС), при которых вероятность обнаружения цели будет не меньше заданной. В качестве примера в табл. 1 приведены значения пороговых отношений сигнал-помеха q_o для вероятности правильного обнаружения $D = 0,8$. Как видим, обнаружение на фоне земной поверхности трехгранного уголка более затруднительно, чем двугранного уголка. Связано это с тем, что статистические поляризационные характеристики помехи более подобны трехгранному, чем двугранному уголкового отражателю.

Практический интерес представляет сравнение характеристик обнаружения целей РЛС с полным поляризационным зондированием (ППЗ) и одноканальной по поляризации РЛС. В одноканальной по поляризации РЛС доступным наблюдению и обработке является лишь только один из элементов матрицы рассеяния – верхний или нижний элемент главной диагонали (горизонтальная или вертикальная поляризация). Для определенности будем полагать, что однополяризационная РЛС излучает и принимает сигналы горизонтальной поляризации. Сразу отметим, что для такой РЛС двугранный уголкового отражатель с углом ориентации $\theta = 45^\circ$ является невидимым.

Таблица 1

Пороговые отношения сигнал-помеха, дБ

Цель	q_0 , дБ
Двугранный уголкового отражатель ($\theta = 0^\circ$)	4,7
Двугранный уголкового отражатель ($\theta = 45^\circ$)	5,0
Длинный провод ($\theta = 45^\circ$)	6,2
Трехгранный уголкового отражатель	7,8

В РЛС с ППЗ полная мощность сигнала, отраженного целью, пропорциональна ее полной эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), а в однополяризационной РЛС она пропорциональна значению ЭПР цели на горизонтальной поляризации. Мощность помехи в РЛС с ППЗ равна сумме диагональных элементов ковариационной матрицы помехи, а в однополяризационной РЛС – только ее первому диагональному элементу. Как легко показать, отношение сигнал-помеха q_{hh} на входе приемника однополяризационной РЛС связано с отношением сигнал-помеха q на входе приемника РЛС с ППЗ соотношением [2, 3]

$$q_{hh} = q \frac{1 + 2\varepsilon_c + \gamma_c}{1 + 2\varepsilon_t + \gamma_t}, \quad (8)$$

где

$$\varepsilon_t = \frac{|\dot{X}_{hvt}|^2}{|\dot{X}_{hht}|^2}, \quad \gamma_t = \frac{|\dot{X}_{vvt}|^2}{|\dot{X}_{hht}|^2}$$

есть отношения ЭПР цели на перекрестной и вертикальной поляризации к значению ЭПР на горизонтальной поляризации.

Потребуем, чтобы обе РЛС в фиксированной помехово-целевой обстановке обеспечивали одинаковую вероятность правильного обнаружения $D = 0,8$ при фиксированной вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$. Тогда для заданного типа цели по данным из табл. 1 можно определить значение порогового отношения сигнал-помеха q_0 в РЛС с ППЗ, а затем вычислить соответствующее ему значение отношения сигнал-помеха q_{hh} на входе приемника однополяризационной РЛС.

В однополяризационной РЛС осуществляется одноканальная оптимальная обработка сигнала с полностью известными параметрами на фоне некоррелированной гауссовой помехи. При этом заданное качество обнаружения ($D = 0,8$, $F = 10^{-4}$) обеспечивается при отношении сигнал-помеха 10,9 дБ (см., например, [4]). Следовательно, выигрыш в помехоустойчивости обнаружения цели РЛС с ППЗ будет равен

$$\Delta q = 10,9 - q_{hh}. \quad (9)$$

В соответствии с изложенной методикой проведены расчеты выигрыша для трех типов целей. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Выигрыш в помехоустойчивости обнаружения, дБ

Цель	Δq , дБ
Двугранный уголкового отражатель ($\theta = 0^\circ$)	4,9
Длинный провод ($\theta = 45^\circ$)	6,4
Трехгранный уголкового отражатель	2,0

Как видим, значение выигрыша в помехоустойчивости обнаружения целей при переходе от РЛС с фиксированной поляризацией к РЛС с полным поляризационным зондированием зависит от типа цели и лежит в диапазоне от 2 до 6,4 дБ.

Выигрыш в помехоустойчивости обнаружения может быть интерпретирован как повышение радиолокационного контраста цели за счет использования дополнительной информации, содержащейся в поляризационных матрицах целей и помеховых отражений. Степень повышения контраста зависит от соотношения между поляризационными характеристиками целей и помех.

Реализация оптимального поляризационного обнаружителя сигналов на фоне гауссовской помехи требует априорного знания поляризационных ковариационных матриц и цели и помехи, а также средних значений элементов матрицы рассеяния цели. В реальных условиях такие статистические данные недоступны. Априорную информацию о статистике целей вообще иметь невозможно, а получить точную информацию о статистических характеристиках помех затруднительно ввиду их пространственной и временной изменчивости, а также зависимости от типа земной поверхности. В этой связи представляют интерес алгоритмы обнаружения, работающие в условиях неполной априорной информации. Одним из таких алгоритмов является алгоритм с использованием поляриметрического выбеливающего фильтра [5].

Поляриметрический выбеливающий фильтр синтезируется по критерию минимума отношения s/m среднеквадратического отклонения мощности помехи к ее среднему значению. Для реализации ПВФ требуется априорное знание ковариационной матрицы помехи. Обработка принимаемого векторного сигнала \mathbf{X} заключается в вычислении квадратичной формы

$$y = \mathbf{X}^T \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{X}, \quad (10)$$

где \mathbf{K}_c^{-1} – матрица, обратная ковариационной матрице помехи. Величина y формируется как некогерентная сумма некоррелированных компонент, чем и достигается снижение среднеквадратического отклонения мощности помехи.

Алгоритм обнаружения с использованием выбеливающего фильтра определяется следующим правилом:

$$y \underset{\text{помеха}}{\overset{\text{цель}}{>}} \hat{m}_y + \hat{\sigma}_y K_{CFAR}, \quad (11)$$

где \hat{m}_y и $\hat{\sigma}_y$ – оценки среднего значения и среднеквадратического отклонения y , получаемые по соседним с испытываемым элементом разрешения, а K_{CFAR} – константа, зависящая от заданной вероятности ложных тревог. При гауссовом распределении помехи обнаружитель, определяемый выражением (11), обеспечивает постоянный уровень ложных тревог.

Развитием поляриметрического выбеливающего фильтра является адаптивный ПВФ, не требующий знания ковариационной матрицы помехи. Обработка принимаемого векторного сигнала в таком фильтре описывается таким же выражением, как и выражение (10), но с заменой известной ковариационной функции на ее оценку по сигналам из нескольких элементов разрешения.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований в работах [2, 6] утверждается, что обнаружитель с использованием ПВФ обеспечивает почти такие же характеристики целей, как и оптимальный поляриметрический обнаружитель, и может обеспечить лучшее среди множества других алгоритмов соотношение между качеством обнаружения и количеством требуемой для этого статистической информации.

Заключение

Таким образом, предложенный алгоритм обнаружения с использованием ПВФ, синтезированный по критерию минимума отношения среднеквадратического отклонения мощности помехи к ее среднему значению обеспечивает почти такие же характеристики целей, как и оптимальный поляриметрический обнаружитель, и может обеспечить лучшее среди множества других алгоритмов соотношение между качеством обнаружения и количеством требуемой для этого статистической информации.

Список литературы

1. Зубкович С. Г. Статистические характеристики сигналов, отраженных от земной поверхности. М. : Сов. радио, 1968. 212 с.

2. Козлов А. И., Логвин А. И., Сарычев В. А. Поляризация радиоволн (Поляризационная структура радиолокационных сигналов). М. : Радиотехника, 2005. 702 с.
3. Козлов А. И., Логвин А. И., Сарычев В. А. Поляризация радиоволн (Радиолокационная поляриметрия). М. : Радиотехника, 2007. 638 с.
4. Быстров Р. П. Радиолокационные системы обнаружения наземных объектов в короткой части миллиметрового диапазона волн. М. : Технология, 2002. Т. 1, 2. 455 с.
5. Novak L. M., Halversen S. D., Owirka G. J., Hiatt M. Effects of Polarization and Resolution on SAR ATR // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1997. Vol. 33, № 1. P. 102–115.
6. Poelman A. J. Nonlinear polarization-vector translation in radar systems. A promising concept for real-time polarization-vector signal processing via a single-notch polarization suppression filter // Proc. Inet. Elect. Eng., Pt. F. 1984. Vol. 131, № 5. P. 451–465.
7. Пафиков Е. А., Годунов А. И., Юрков Н. К., Николаев О. В. Алгоритмы адаптивного обнаружения сигнала, отраженного от малоразмерных наземных целей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 32–43. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-4
8. Волотов Е. М., Волотова Т. А., Митрофанов И. В., Митрофанов Е. И. Модель погрешности определения параметров траектории при использовании системы регистрации на базе видеокамер общего назначения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 29–37. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-4

References

1. Zubkovich S.G. *Statisticheskie kharakteristiki signalov, otrazhennykh ot zemnoy poverkhnosti = Statistical characteristics of signals reflected from the Earth's surface*. Moscow: Sov. radio, 1968:212. (In Russ.)
2. Kozlov A.I., Logvin A.I., Sarychev V.A. *Polyarizatsiya radiovoln (Polyarizatsionnaya struktura radiolokatsionnykh signalov) = Polarization of radio waves (Polarization structure of radar signals)*. Moscow: Radiotekhnika, 2005:702. (In Russ.)
3. Kozlov A.I., Logvin A.I., Sarychev V.A. *Polyarizatsiya radiovoln (Radiolokatsionnaya polyarimetriya) = Polarization of radio waves (Radar polarimetry)*. Moscow: Radiotekhnika, 2007:638. (In Russ.)
4. Bystrov R.P. *Radiolokatsionnye sistemy obnaruzheniya nazemnykh ob"ektov v korotkoy chasti millimetrovogo diapazona voln = Radar systems for detecting ground objects in the short part of the millimeter wave range*. Moscow: Tekhnologiya, 2002;1, 2:455. (In Russ.)
5. Novak L.M., Halversen S.D., Owirka G.J., Hiatt M. Effects of Polarization and Resolution on SAR ATR. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1997;33(1):102–115.
6. Poelman A.J. Nonlinear polarization-vector translation in radar systems. A promising concept for real-time polarization-vector signal processing via a single-notch polarization suppression filter. *Proc. Inet. Elect. Eng., Pt. F*. 1984;131(5):451–465.
7. Pafikov E.A., Godunov A.I., Yurkov N.K., Nikolaev O.V. Algorithms for adaptive detection of a signal reflected from small-sized ground targets. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):32–43. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-4
8. Volotov E.M., Volotova T.A., Mitrofanov I.V., Mitrofanov E.I. Model of the error in determining trajectory parameters when using a registration system based on general-purpose video cameras. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):29–37. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-4

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Анатольевич Пафиков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры производства
и эксплуатации боеприпасов,
Филиал Военной академии материально-
технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: evgeniy_pafikov@mail.ru

Андрей Владимирович Петешов

кандидат технических наук, доцент,
начальник кафедры радиоэлектронных средств,
Военный университет радиоэлектроники
(Россия, г. Череповец, ул. Ленина, 123)
E-mail: peteshov_76@mail.ru

Evgeniy A. Pafikov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of production and operation of ammunition,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Military Town, Penza, Russia)

Andrey V. Peteshov

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of radioelectronics,
Military University of Radio Electronics
(123 Lenina street, Cherepovets, Russia)

Антон Сергеевич Ишков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: asihkov@mail.ru

Anton S. Ishkov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio engineering and radioelectronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 07.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 14.10.2023

Принята к публикации/Accepted 23.10.2023

МЕТОДИКА ПРОФИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. И. Власов¹, А. В. Гараев², В. О. Захарова³, К. В. Селиванов⁴, Д. Д. Чернышов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия
¹ vlasovai@bmstu.ru, ² garaevalexei@yandex.ru, ³ valeriyashe@yandex.ru,
⁴ selivanov_kv@mail.ru, ⁵ saints@fan20012.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* 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. *Материалы и методы.* Основное внимание уделяется методикам создания компонентов беспилотных аппаратов на основе аддитивных технологий. Сформирован модельный ряд деталей беспилотных аппаратов, изготовление которых возможно при использовании аддитивных технологий, проанализированы преимущества и недостатки использования данных деталей при производстве беспилотных машин. *Результаты и выводы.* Был разработан алгоритм методики профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий и даны рекомендации инженерам-технологам по оптимизации и внедрению аддитивных технологий для создания деталей для компонентов беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, беспилотный летательный аппарат, дрон, квадрокоптер, селективное лазерное плавление, моделирование методом послойного наплавления, лазерная стереография

Финансирование: отдельные результаты получены в проекте «ПРИОР/СН/НУ/22/СП2/5» по Программе развития МГТУ им. Н. Э. Баумана в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Власов А. И., Гараев А. В., Захарова В. О., Селиванов К. В., Чернышов Д. Д. Методика профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 95–110. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-9

ADDITIVE TECHNOLOGIES AND PROFILING OF GENERAL PURPOSE DRONES: THE FUTURE OF AVIATION

A.I. Vlasov¹, A.V. Garaev², V.O. Zakharova³, K.V. Selivanov⁴, D.D. Chernyшов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
¹ vlasovai@bmstu.ru, ² garaevalexei@yandex.ru, ³ valeriyashe@yandex.ru,
⁴ selivanov_kv@mail.ru, ⁵ saints@fan20012.ru

Abstract. *Background.* The paper analyzes modern additive technologies and their application for the production of unmanned aerial vehicles. The methods and means of UAV profiling based on additive technologies have been systematized and generalized. The possibilities of additive technologies and their advantages in comparison with traditional technologies for the production of parts of various machines are systematized. *Materials and methods.* The main attention is paid to the methods of creating components of UAVs based on additive technologies. The model range of drone parts, the production of which is possible by using additive technologies is formed, the advantages and disadvantages of using these parts in the production of unmanned machines are analyzed. *Results and conclusions.* An algorithm for UAV profiling methodology based on additive technologies has been developed and recommendations for engineers and technologists on optimization and implementation of additive technologies for creating parts and components for unmanned aerial vehicles have been given.

Keywords: additive technologies, unmanned aerial vehicle, drone, quadcopter, selective laser melting, layer-by-layer fusion modeling, laser stereography

Financing: some results were obtained in the PRIOR/CH/NU/22/SP2/5 project under the Bauman Moscow State Technical University Development Program within the framework of the Priority 2030 Strategic Academic Leadership Program.

For citation: Vlasov A.I., Garaev A.V., Zakharova V.O., Selivanov K.V., Chernyshov D.D. Additive technologies and profiling of general purpose drones: the future of aviation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(4):95–110. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-9

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – это автономные летательные аппараты, которые могут быть управляемыми оператором или функционировать в автономном режиме [1]. Развитие этой технологии началось еще в 20-х гг. прошлого века, но наибольшее развитие БПЛА получили в последние десятилетия благодаря прорывам в области электронных компонентов, компьютерных технологий и алгоритмов управления. БПЛА широко применяются в различных отраслях, включая гражданскую и военную авиацию, аэрофотосъемку, картографию, мониторинг и дрон-доставку [2].

В статье объектом исследования являются аддитивные технологии и профилизация электронных аппаратов общего назначения под конкретно решаемые задачи, а также производство современных беспилотных аппаратов.

Профилизация в производстве беспилотных летательных аппаратов может относиться к анализу характеристик использования и работы БПЛА, а также к анализу данных, полученных с БПЛА во время его полетов. В производстве БПЛА профилизация может включать в себя анализ производительности различных компонентов БПЛА, таких как корпус, двигатели, система управления, система сбора данных и др. Это может помочь определить узкие места в работе БПЛА и улучшить его производительность и надежность [3].

Предметом исследования в данной статье является применение аддитивных технологий в производстве беспилотных летательных аппаратов. В статье рассматривается, как профилизация производственного процесса БПЛА и применение аддитивных технологий могут быть применены для изготовления компонентов и деталей беспилотных систем [4], а также как профилизация может повысить их эффективность и безопасность. Также в статье рассматриваются преимущества использования аддитивных технологий и профилизации в авиационной индустрии, а также возможные направления развития в этой области [5].

Актуальность работы обусловлена быстро растущим развитием беспилотных технологий, которые находят все более широкое применение в различных сферах экономики. В частности, такие технологии, как аддитивные технологии и профилизация, могут оказать значительное влияние на развитие беспилотных систем в авиационной индустрии [6].

Применение аддитивных технологий позволяет более быстро и эффективно изготавливать детали и компоненты систем управления беспилотными летательными аппаратами. Они также позволяют производить более сложные детали, которые сложнее и дороже изготовить традиционными методами.

Профилизация, в свою очередь, позволяет определить оптимальную конфигурацию деталей и систем беспилотных систем, подходящих для различных задач и условий эксплуатации, что повышает их эффективность и надежность, а также улучшает меры безопасности.

Аддитивные технологии отражают концепцию бережливого производства. Концепция бережливого производства предусматривает минимизацию отходов, экономию ресурсов и устранение излишеств в процессе производства, а также сокращение времени и затрат на производство продукции. Аддитивные технологии, такие как 3D-печать, позволяют создавать изделия с минимальным количеством отходов, быстро и с меньшими затратами на производство. Они также позволяют создавать детали с высокой точностью и качеством, что уменьшает количество брака и необходимость повторных производственных циклов.

Цель работы: разработать методику профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий.

Постановка задачи: оценить использование аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных аппаратов и сделать вывод о рациональности использования этих технологий.

Для достижения заявленной цели в работе предусматривается **решение следующего комплекса задач:**

- проанализировать возможности аддитивных технологий в производстве компонентов и деталей для беспилотных аппаратов;
- оценить преимущества и недостатки аддитивных технологий в сравнении с традиционными способами производства для производства деталей для беспилотных летательных аппаратов;

– исследовать, как профилизация может использоваться для повышения эффективности производства и снижения затрат при производстве беспилотных летательных аппаратов.

Методы, используемые для решения поставленной задачи:

– анализ литературы и исследований по применению аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных летательных аппаратов;

– анализ примеров успешного применения аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных БПЛА, а также сбор и анализ данных о затратах и преимуществах внедрения этих методов;

– составление рекомендаций по применению аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных машин на основе проведенных исследований и анализа данных.

Источниками для анализа являются:

– информация о применении аддитивных технологий для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов [4];

– методика профилизации в контексте беспилотных летательных аппаратов [5];

– рекомендации по синтезу компонентов систем беспилотных летательных аппаратов и возможности их изготовления с помощью аддитивных технологий [6].

В рамках данной работы предложена методика профилизации БПЛА на основе аддитивных технологий. Приведены этапы данной методики, начиная от анализа требований к БПЛА, заканчивая производством конструкции на 3D-принтере. Показаны преимущества данной методики, такие как экономическая эффективность, точность и быстрота производства.

Результаты исследований могут быть полезны как проектировщикам и инженерам, работающим в области разработки БПЛА, так и широкой аудитории, интересующейся современными технологиями производства и их применением в создании беспилотных летательных аппаратов.

Обзор литературы

Аддитивные технологии – это технологии, при которых изделия создаются путем нанесения множества слоев материала на основе компьютерного преобразования топологии. Они развиваются очень быстро и находят все более широкое применение во многих отраслях, в том числе в производстве беспилотных летательных аппаратов. Аддитивные технологии получили широкое развитие начиная с середины 80-х гг. прошлого века. Обзор аддитивных технологий приведен в работе [6].

В 1980 г. Хидео Кодама (Муниципальный промышленный исследовательский институт Нагоя) подал заявку на регистрацию патента на устройство, которое с помощью УФ-засветки послойно формировало жесткий объект из фотополимерной смолы [6].

В 1983 г. трое французских инженеров: Ален ЛеМехо, Оливье де Витт и Жан-Клод Андрэ (Национальный центр научных исследований), предложили при создании «фрактальных объектов» применить лазер для превращения мономера в полимер [6].

В 1984 г. Ч. Халл (США) предложил использовать технологию «стереолитографии» (SLA, Stereolithography Apparatus) для печати пространственных моделей по данным цифровых моделей из фотополимеризуемых композитных материалов [7].

В 1985 г. Михайло Фейген предложил послойно формировать объемные модели из листового материала: пленок, полиэстера, композитов, пластика, бумаги и т.д., скрепляя между собой слои при помощи разогретого валика. Такая технология получила название «производство объектов ламинированием» (LOM, Laminated Object Manufacturing, создание многослойного объекта) [6].

В 1986 г. К. Декарт и Б. Биман (Техасский университет в Остине) получили патент на метод селективного лазерного спекания (SLS, Selectivelasersintering) [6].

В 1987 г. – израильской компанией Cubital была разработана Технология послойного уплотнения (SGC, solidgroundcuring) [6].

В 1988 г. Скотт Крамп предложил более простой и дешевый способ 3D-печати – FDM (Fused Deposition Modelling, метод послойного наплавления). FDM 3D-печать – это технологии послойного наплавления пластикой нити [8].

В 1993 г. Массачусетский технологический институт (MIT) патентует технологию трехмерной печати 3DP (Печать склеиваемым порошком, Three-Demensionalprinting), подобную струйной технологии обычных 2D-принтеров [6].

В 1993 г. Michigan University, USA, разработан процесс направленного нанесения металла (DirectMetalDeposition – DMD) [6].

В 1994 г. в Liverpool University, UK, предложен метод объемной лазерной наплавки (3D Laser Cladding) и метод объемной лазерной генерации (3D Lasergenerating, Fraunhofer-Institute of Production Technology (IPT), Germany) [6].

В 1996 г. Sandia National Laboratories & Sandia University (USA) разработан процесс лазерного формирования (Laser Engineered Net Shaping – LENS) [6].

В 1999 г. предложен метод объемной лазерной сварки (3D Laser Welding, Southern Methodist University, USA) [6].

В 2005 г. Эдриан Боуэр (Университет Бата, Великобритания) инициировал открытый проект RepRap (Replicating Rapid Prototyper) – самовоспроизводящийся механизм для быстрого изготовления прототипов [6].

2008 г. Objet Geometries Ltd разработала принтер Connex500, печатающий несколькими различными материалами сразу (3DP, печать склеиваемым порошком, Three-Demensional printing). Сейчас количество материалов перевалило за 100 [6].

Томас Боланд (Клемсонский университет) запатентовал использование струйной печати для 3D-печати живых клеток, что сделало возможным печать человеческих органов в будущем. 8 декабря 2010 г. медицинская компания Organovo, Inc., объявила о создании технологии, которая сможет создавать искусственные кровеносные сосуды на 3D-принтере [9].

Параллельно шли разработки и других технологий. Обобщенная классификация основных аддитивных технологий представлена на рис. 1 [10–13].



Рис. 1. Распространенные виды аддитивных технологий

Беспилотные летательные аппараты или дроны становятся все более распространенными во многих отраслях, таких как медицина, транспортировка товаров и разведка.

Современные беспилотники могут выполнять разнообразные задачи, такие как съемка видео из воздуха, охрана границ, проведение спасательных операций в специальных условиях, исследование труднодоступных мест и т.д. Они могут быть маленькими и легкими или крупными и грузоподъемными, чтобы транспортировать большие грузы на значительные расстояния.

Развитие беспилотных летательных аппаратов активно продвигается в разных странах мира (США, Китай, Израиль, Япония, Франция, Россия). Современные БПЛА сочетают в себе высокую маневренность, точность в работе систем наведения и стабилизации, а также автономность [14].

Существует несколько типов БПЛА – от самых маленьких мультикоптеров, которые могут легко размещаться на ладони, до массивных летательных аппаратов, способных транспортировать грузы весом до нескольких тонн.

Во многих классификациях по назначению БПЛА разделяют на военные и гражданские. Однако, видимо, более логичным является подразделение, в котором БПЛА подразделяются вначале по укрупненным сферам использования, а именно для научных целей и для прикладных целей; последние же подразделяются на БПЛА для военного и гражданского применения.

В научной сфере БПЛА используются для получения новых знаний, причем не имеет значения то, из какой области эти знания и где они потом будут применены. Это могут быть испытания новой техники (в том числе новых принципов полета) или наблюдения за природными явлениями [15].

Обзор вышеперечисленной литературы позволяет получить более глубокое понимание методики профилизации БПЛА на основе аддитивных технологий, а также определить новые направления и подходы в данной области.

Применение аддитивных технологий в производстве беспилотных летательных аппаратов имеет уже несколько успешных примеров:

– General Electric (<https://www.ge.com/>) – компания General Electric использует аддитивные технологии для создания компонентов для своих беспилотных летательных аппаратов, в том числе для создания турбинных лопастей и других деталей;

– беспилотный летательный аппарат Airbus Albatross One (<https://www.airbus.com/en/innovation/disruptive-concepts/biomimicry/albatrossone>): для производства компонентов аппарата была использована технология SLM (Selective Laser Melting), которая позволила создать компоненты с высокой прочностью и низким весом (рис. 2);

– беспилотный летательный аппарат DJI Agras MG-1 (<https://www.dji.com/ru/mg-1>): для производства корпуса аппарата была использована технология фюзели, которая позволила создать корпус с высокой жесткостью и низким весом (рис. 2);

– Aurora Flight Sciences (<https://www.aurora.aero/>): компания использовала технологии аддитивного производства для создания композитных крыльев беспилотного летательного аппарата XV-24A LightningStrike (https://en.wikipedia.org/wiki/Aurora_XV-24_LightningStrike), который имеет вертикальный взлет и посадку, крылья для данного летательного аппарата были созданы с использованием специальной технологии профилизации, что позволило достичь максимальной эффективности полета (рис. 2);

– Lockheed Martin (<https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2023/ctrl-p-3d-printing-an-f-35-cockpit.html>): компания использует технологии аддитивного производства для создания деталей беспилотных летательных аппаратов, таких как крылья, обшивки и детали двигателей, компания использовала аддитивное производство для создания композитных крыльев беспилотного летательного аппарата RQ-170 Sentinel (рис. 2).

Классификация БПЛА по видам задач на рис. 2.

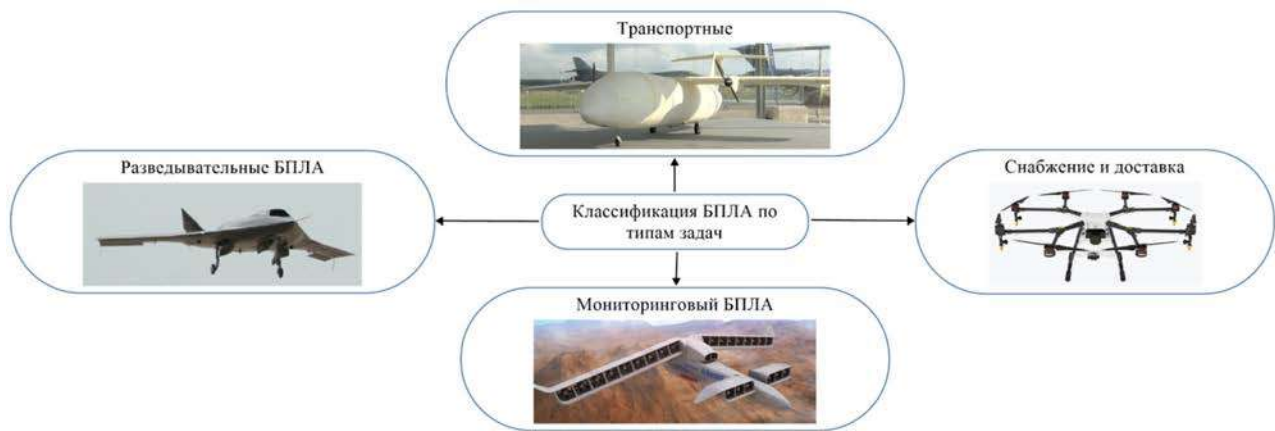


Рис. 2. Классификация БПЛА по типам задач

Проблемы, связанные с применением аддитивных технологий в производстве беспилотных летательных аппаратов, которые уже решены:

– разработка и улучшение программного обеспечения для проектирования и создания цифровых моделей беспилотных летательных аппаратов;

– создание высокопроизводительных принтеров с возможностью печатать крупные и сложные детали;

– создание новых материалов для 3D-печати, таких как углеродные композиты, которые обеспечивают легкость, прочность и надежность конструкции;

– методы контроля качества печати, такие как использование 3D-сканера и анализ качества поверхности.

Проблемы, которые следует решить:

– улучшение процесса обучения и обучения кадров и инженеров, чтобы они могли использовать новые технологии и программное обеспечение;

- развитие новых программных продуктов для симуляции и тестирования беспилотных летательных аппаратов перед полетом;
- надежность и безопасность беспилотных летательных аппаратов, включая разработку системы самодиагностики и автономного управления;
- разработка стандартов и регуляций для безопасного и эффективного использования беспилотных летательных аппаратов в различных отраслях, включая аэрокосмическую, гражданскую и промышленную;
- отсутствие методологии по применению аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных летательных аппаратов.

Решению последней проблемы посвящена данная статья – разработке методики профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий.

Методы и средства аддитивных технологий в производстве компонентов и деталей для беспилотных аппаратов

Классификация аддитивных технологий

Аддитивное производство, или аддитивный технологический процесс – это процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки)¹.

Для производства компонентов и деталей для беспилотных аппаратов аддитивные технологии могут быть применены следующим образом:

- непосредственное изготовление деталей, которые будут использоваться в качестве шаблонов для конечного изделия;
- для изготовления пресс-форм с помощью аддитивных методов, потом их можно использовать для формовки и литья изделий.

Технологии 3D-печати позволяют создавать ранее недоступные сложные формы, например, соты структуры (рис. 3), криволинейные пространственные поверхности, внутренние каналы, имеющие изгибы и прочие поверхности, изготовление которых традиционными способами невозможно или весьма трудоемко (<https://3dtoday.ru/blogs/zhvltl/how-to-choose-filling-for-3d-printing>). Аддитивные технологии позволяют напечатать корпус, крыло и лопасть БПЛА (рис. 4) (<https://tsar3d.ru/tag/promyshlennoe-ispolzovanie/>).

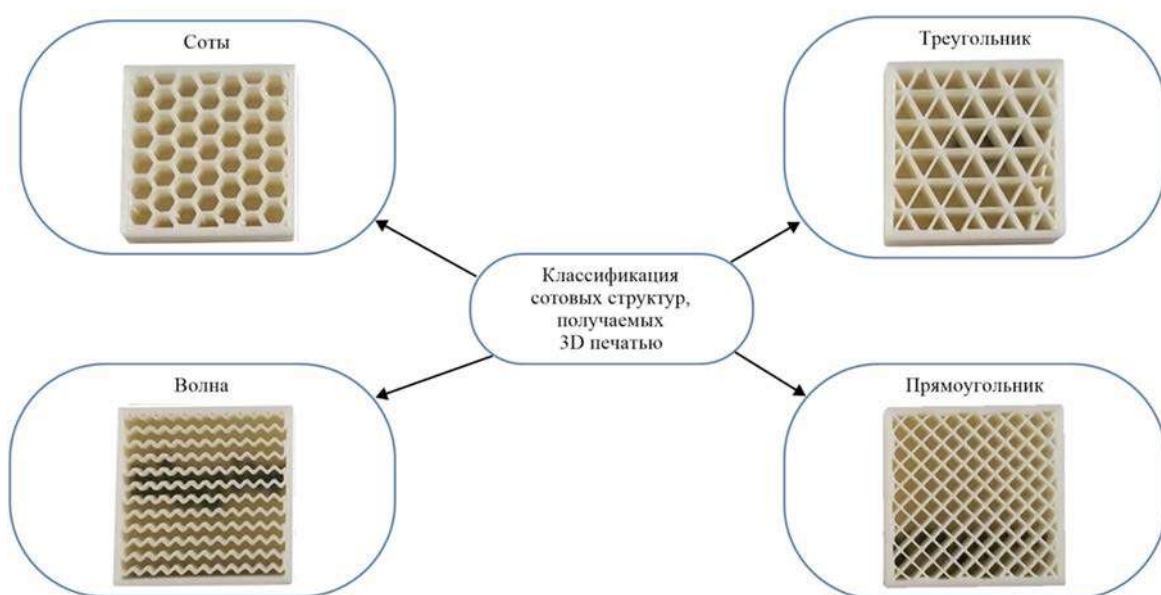


Рис. 3. Модели сотовых структур, напечатанных на 3D принтере

¹ ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015.

В настоящее время из всего многообразия видов 3D-печати распространены следующие технологии (рис. 5): SLM (Selectivelasermelting, 3D-печать металлом) [16], SLA (Stereolithography, 3D-печать моделей из жидкого полимера) [7], FDM (Fused Deposition Modeling, послойная 3D-печать нитью пластика) [9].



Рис. 4. Модель лопасти БПЛА, напечатанная на 3D-принтере



Рис. 5. Распространенные виды пластиков для печати

Данные технологии используются для изготовления изделий летательных аппаратов, работающих в условиях агрессивных сред под высокими динамическими нагрузками, может быть интересна технология SLM-печати, позволяющая получить наиболее точные и прочные изделия с плотной внутренней структурой. Для менее ответственных деталей могут быть использованы технологии FDM или SLA-печати, позволяющие изготовить легкую деталь сложной формы из широкого ряда пластиков и смол.

Технология FDM подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, такие как: ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene [17], акрилонитрил бутадиен стирол), PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol [18], полиэтилентерефталат гликоль), PLA (Polylactic Acid [18], полимолочная кислота), поставляемые в виде катушек нитей или прутков.

Стереолитография (SLA, Stereolithography) [7] – это процесс аддитивного производства, результат в котором достигается посредством полимеризации смолы. В SLA печати, объект создается путем селективного отверждения полимерной смолы, слой за слоем, с использованием ультрафиолетового (УФ) лазерного луча. Материалы, используемые в SLA печати, представляют собой светочувствительные термореактивные полимеры, которые выпускаются в жидкой форме.

3D-печать металлом (SLM, Selectivelasermelting) –технология производства сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD-моделям (3D-печать металлом) [16]. Несмотря на некоторые недостатки, данная технология предоставляет ряд несомненных преимуществ перед традиционными методами получения заготовок.

Теперь более подробно рассмотрим недостатки и преимущества данной технологии в производстве беспилотных аппаратов.

Преимущества и недостатки аддитивных технологий

Применение аддитивных технологий в производстве деталей беспилотных летательных аппаратов имеет ряд преимуществ, представленных на рис. 6.



Рис. 6. Преимущества применения аддитивных технологий в производстве БПЛА

Рассмотрим каждое из преимуществ более подробно:

- с помощью 3D-печати сложные детали можно изготовить за несколько часов, в то время как традиционные методы могут занять месяцы, и часто после печати дополнительная механическая обработка не требуется;

- применение аддитивных методов позволяет избежать отходов, поскольку если металлическая деталь не получилась, ее можно вновь превратить в порошок и использовать для повторной печати того же изделия, в то время как в традиционном производстве большой риск отправить неверно изготовленную деталь в отходы;

- применение аддитивных технологий позволяет изготавливать изделия с уникальными свойствами, без швов и стыков, что невозможно сделать с помощью традиционных методов производства, таких как сварка и штамповка;

- возможность печати из большого спектра порошковых металлов, таких как: нержавеющая сталь, инструментальная сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан, алюминий, золото и др, пластиков и смол;

- разрешение печати от 20 до 100 микрон [16];

- гибкость производства: 3D-печать может производить детали с высокой степенью гибкости, что может позволить производить индивидуальные, на заказ, детали и беспилотные летательные аппараты;

- снижение стоимости: 3D-печать может существенно сократить затраты на производство деталей, особенно при производстве небольшой партии беспилотных летательных аппаратов;

- уменьшение веса: 3D-печать может производить детали с комплексной геометрией и соответствующими свойствами, что может уменьшить вес беспилотных летательных аппаратов и увеличить их эффективность.

Основные недостатки применения аддитивных технологий в производстве деталей БПЛА оформлены в виде ментальной карты и представлены на рис. 7.



Рис. 7. Недостатки применения аддитивных технологий в производстве БПЛА

Рассмотрим каждый из недостатков более подробно:

- сфероидизация некоторых цветных металлов;
- наличие внутренних напряжений;
- ограниченные материалы: не все материалы могут быть использованы в 3D-печати, что может ограничить выбор материалов для производства беспилотных летательных аппаратов;
- ограниченный размер: большинство 3D-принтеров имеют ограниченный размер печатной платформы, что может ограничить размер производимых деталей, а следовательно, и размеры беспилотных летательных аппаратов;
- низкая производительность при серийном производстве: 3D-печать может быть медленной и требовать значительных затрат времени на производство деталей, что может снизить производительность процесса производства и увеличить время на внедрение беспилотных летательных аппаратов на рынок;
- ограниченная точность: 3D-печать может иметь ограниченную точность, что может привести к необходимости дополнительной обработки деталей и повышению стоимости производства;
- ограниченная прочность: 3D-печать может иметь низкую прочность по сравнению с традиционными методами производства, что может быть проблемой для производства беспилотных летательных аппаратов, которые должны быть надежными и безопасными;
- высокая стоимость: 3D-печать может быть дорогой, особенно при использовании высококачественных материалов, что может привести к высокой стоимости производства беспилотных летательных аппаратов [16].

Результат применения методики профилизации как средства повышения эффективности производства компонентов БПЛА

Профилизация в производстве – это процесс анализа и измерения производственных процессов с целью выявления проблемных мест, оптимизации процессов и повышения эффективности производства [3].

Профилизация позволяет получить детальную информацию о производственных процессах, выявлять проблемные места и определять, какие шаги необходимо предпринять для повышения производительности и качества продукции.

В процессе профилизации производства используются различные методы и инструменты, такие как сбор данных о времени выполнения каждого этапа производственного процесса, анализ данных, определение причин задержек и снижения производительности, а также разработка и реализация мероприятий по оптимизации производственных процессов.

Профилизация в производстве частей БПЛА может быть полезной технологией для повышения эффективности производства и снижения затрат на производство. Профилизация в производстве позволяет выявить проблемные места в процессе производства, определить причины задержек и снижения производительности, а также оптимизировать процессы производства.

Одним из основных преимуществ профилизации производства является возможность определения оптимальной скорости производства. Путем анализа процессов производства БПЛА можно выявить места, где процессы замедляются, и определить, какие шаги необходимо предпринять для ускорения производства.

Также профилизация производства позволяет выявить проблемы в процессе производства, которые могут привести к повышенным затратам на производство. Например, можно выявить, какие материалы или оборудование используются неэффективно, и определить, какие изменения необходимы для снижения затрат и повышения эффективности.

Следующим преимуществом профилизации производства является возможность улучшения качества продукции. Это достигается анализом процессов производства БПЛА, следствием которого является выявление мест, где возможны ошибки и дефекты, и определением шагов необходимых для предотвращения их появления.

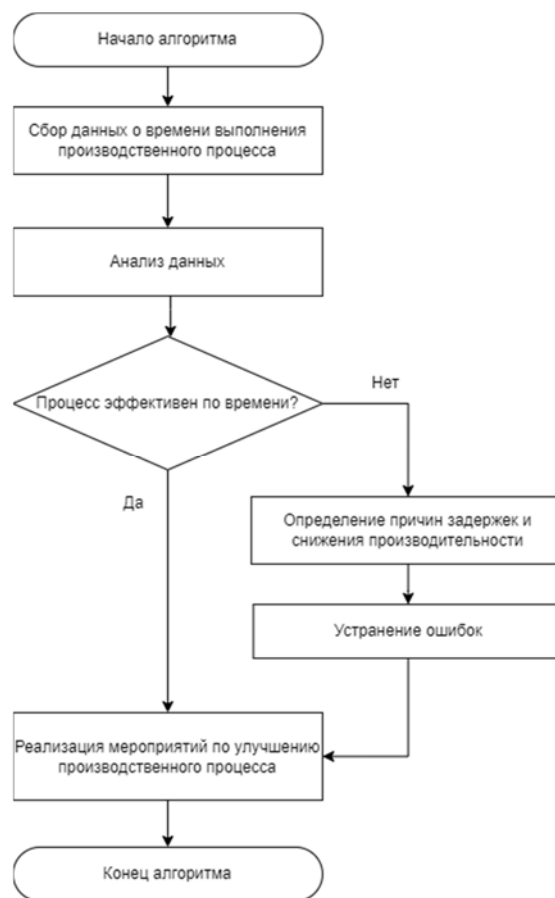


Рис. 8. Методика профилизации БПЛА на основе аддитивных технологий

Таким образом, профилизация производства БПЛА может быть очень полезным инструментом для повышения эффективности производства и снижения затрат на него, а также улучшения качества продукции и тем самым повышения конкурентоспособности на рынке БПЛА. Например, система управления полетом БПЛА состоит из различных компонентов, таких как контроллер полета, гироскопы, акселерометры, компасы и др. В процессе производства БПЛА может возникнуть необходимость оптимизации работы системы управления полетом, чтобы обеспечить более точное и надежное управление БПЛА во время полета. Для этого в производстве БПЛА может применяться профилизация. В ходе профилизации разработчики могут анализировать данные, полученные от системы управления полетом во время тестовых полетов, и определять, какие участки кода занимают больше всего времени выполнения, какие функции вызываются чаще всего, сколько времени занимает работа с памятью и другие характеристики работы системы управления полетом. На основе этих данных программисты могут улучшать код системы управления полетом, устранить проблемные места в работе системы и повысить ее производительность и надежность. Это может помочь обеспечить более точное управление БПЛА, улучшить его возможности и повысить безопасность полетов.

Рекомендации по применению аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных аппаратов

Подводя итог, можно сказать, что аддитивные технологии могут быть полезными инструментами в производстве беспилотных аппаратов. Они позволяют быстро и точно создавать прототипы, а также производить детали и компоненты с высокой точностью и сложной геометрией. Можно сформулировать следующие рекомендации по применению аддитивных технологий в производстве БПЛА:

- благодаря возможности быстрого создания физических моделей деталей и компонентов БПЛА 3D-печать может быть использована для создания прототипов и тестирования их на практике, что значительно сокращает время и затраты на разработку;

- применение 3D-печати в производстве может позволить изготавливать сложные детали и компоненты с высокой точностью и сложной геометрией, которые трудно или невозможно произвести с помощью традиционных методов производства, что может потребоваться для создания БПЛА;

- использование материалов высокой прочности: при производстве деталей и компонентов БПЛА с помощью 3D-печати следует использовать материалы высокой прочности, такие как углеродистые волокна или металлы, чтобы обеспечить необходимую прочность и долговечность.

Что же касается профилизации в производстве беспилотных аппаратов, то некоторые из рекомендаций могут быть следующими:

- сбор данных о производственных процессах: сбор данных о времени выполнения каждого этапа производственного процесса, о возможных проблемах и задержках может помочь выявить проблемные места в производственном процессе и определить, какие шаги необходимо предпринять для повышения эффективности производства;

- анализ данных, собранных в процесса производства, может помочь выявить причины задержек и снижения производительности и определить, какие меры необходимо предпринять для повышения эффективности производства;

- применение методов оптимизации: методы оптимизации, такие как SixSigma и Lean Manufacturing, могут быть использованы для оптимизации производственных процессов и повышения эффективности производства;

- разработка мероприятий по улучшению производства: на основе анализа данных и применения методов оптимизации можно разработать мероприятия по улучшению производства, которые позволят повысить эффективность производственных процессов и качество продукции.

Обсуждение применения аддитивных технологий и профилизации в производстве беспилотных аппаратов

Применение аддитивных технологий в производстве БПЛА уже сейчас является широко распространенной практикой, и ожидается, что их использование будет продолжать расти в будущем. Наиболее авторитетным источником информации о состоянии и развитии аддитивных технологий, признанным мировым технологическим сообществом, является консалтинговая компания Wohlers Associates Inc. (WAI), издающая с 1996 г. ежегодные статистические отчеты. Согласно Wohlers Report-2023, мировой объем рынка продукции и услуг к 2023 г. достиг 18 млрд долл. (рис. 8) (<https://wohlersassociates.com/product/wr2023/>).

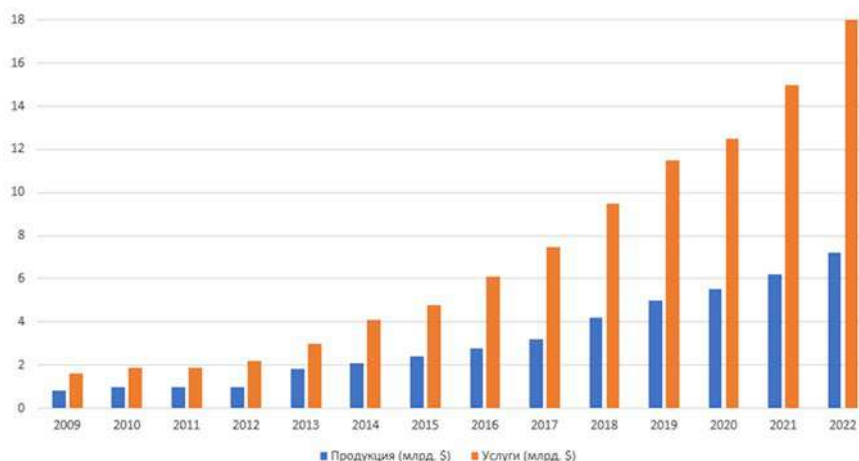


Рис. 8. Гистограмма объема рынка продукции и услуг за 2023 г.

Мировой рынок аддитивных технологий с 2014 по 2020 г. рос со среднегодовыми темпами в 19,3%, достигнув к 2020 г. объема почти в 12 млрд долл. Согласно отчету GlobalData, в настоящее время на долю рынка 3D-печати приходится менее 0,1% от общего мирового производственного рынка, который оценивается в 12,7 трлн долл. (рис. 9) (<https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tehnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tehnologiy-v-proizv/>).

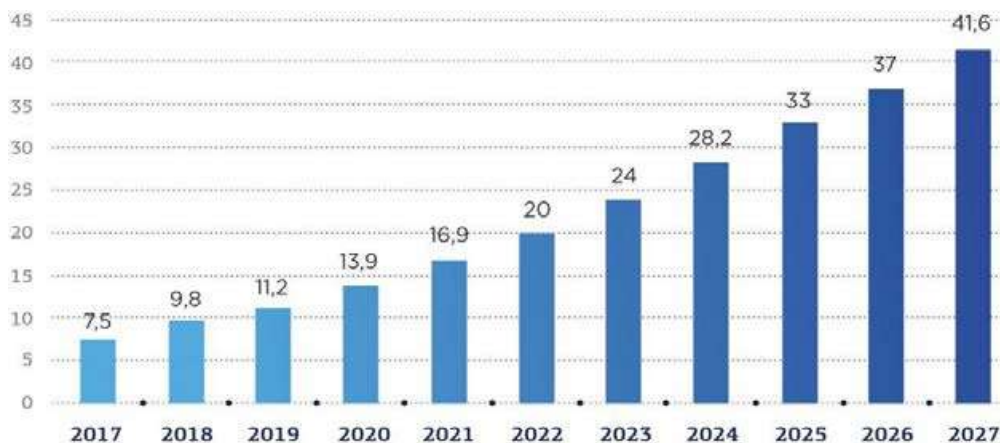


Рис. 9. Гистограмма состояния и прогноза объема мирового рынка аддитивных технологий, млрд долл.

Прогнозируется также, что самыми крупными областями применения аддитивного производства будут аэрокосмическая и оборонная промышленность. Следом активно будет развиваться аддитивное производство в сфере автомобильной промышленности, а также стоматологии и производстве медицинских имплантов. Вкупе все указанные отрасли будут занимать более 50 % рынка (рис. 10) (<https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tehnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tehnologiy-v-proizv/>).



Рис. 10. Гистограмма сегментации рынка аддитивных технологий

Аддитивные технологии позволяют создавать сложные геометрические формы и компоненты, которые могут быть трудно или невозможно изготовить традиционными методами. Это позволяет улучшить производительность и качество БПЛА, а также снизить себестоимость производства, что также приводит к развитию их применения.

Профилизация в производстве БПЛА также имеет большой потенциал для улучшения производительности и эффективности. Профилизация позволяет создавать оптимальные профили крыльев и других компонентов БПЛА, что улучшает его аэродинамические свойства и позволяет снизить расход топлива, а также профилизация может улучшить управляемость и маневренность БПЛА.

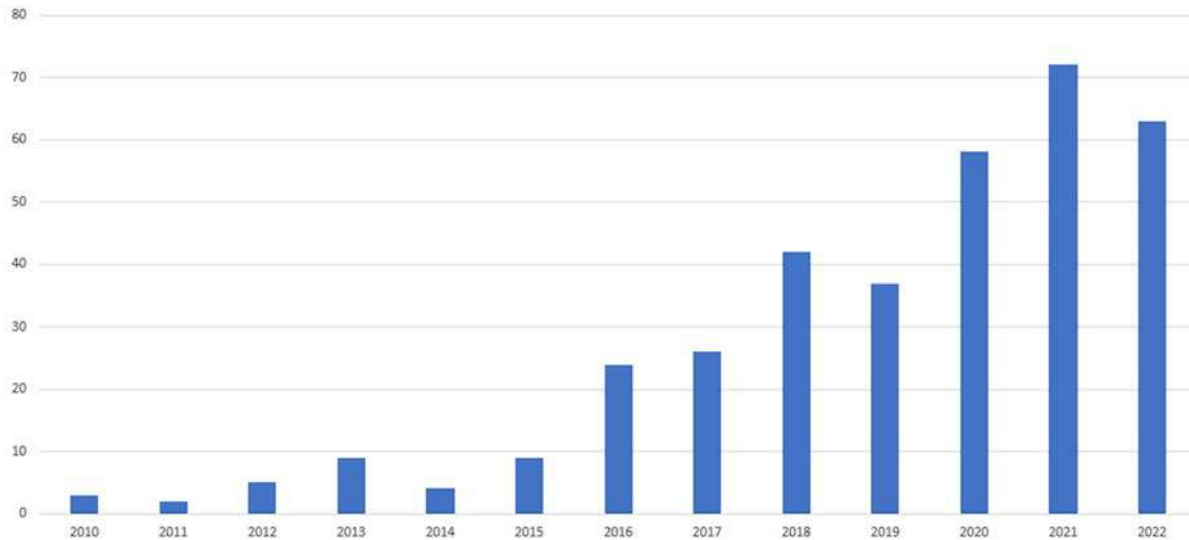


Рис. 11. Гистограмма частоты упоминания ключевых слов «Аддитивные технологии» и «БПЛА» в публикациях, индексируемых в системе РИНЦ

В целом применение аддитивных технологий и профилизация в производстве БПЛА имеют большой потенциал для улучшения производительности, качества и эффективности БПЛА. Однако, как и в любой новой технологии, есть и некоторые вызовы, такие как высокая стоимость и сложность процесса производства. Однако с развитием технологий и увеличением опыта в производстве, ожидается, что эти вызовы будут преодолены и аддитивные технологии и профилизация будут все более широко применяться в производстве БПЛА.

Заключение

Применение аддитивных технологий для создания деталей и компонентов БПЛА общего назначения позволяет ускорить процесс разработки и снизить затраты на изготовление. Благодаря этому создание новых моделей может происходить быстрее и эффективнее, что позволяет улучшить качество и функциональность продуктов.

Профилизация беспилотников общего назначения – это технология, которая позволяет при помощи алгоритмов оптимизировать конструкцию беспилотника под конкретные условия эксплуатации. Это дает возможность создать максимально эффективное и оптимальное решения для каждой конкретной задачи.

Применение этих технологий уже активно осуществляется в авиационной индустрии. БПЛА, созданные с использованием аддитивных технологий и профилизации, могут легко адаптироваться к различным задачам, выполнять их точно и эффективно, ускоряя и автоматизируя процессы. Это дает возможность улучшить производительность, снизить затраты и повысить качество продукции, что является основой конкурентоспособности.

Таким образом, использование аддитивных технологий и профилизации в авиации имеет большой потенциал для создания эффективных и перспективных продуктов, а их применение уже сегодня позволяет значительно сократить затраты и повысить качество.

В работе подобраны аддитивные технологии, применяемые для производства беспилотных летательных аппаратов и даны рекомендации для инженеров-технологов, для оптимизации и внедрения новых технологий в технологические процессы. А также инженерам для более быстрого создания прототипов и использования аддитивных технологий для создания различных деталей беспилотных летательных аппаратов и разнообразных систем.

Список литературы

1. Лавров А. В., Власов Д. С. Методы и средства мониторинга характеристик БПЛА в реальном времени // Технологии инженерных и информационных систем. 2019. № 4. С. 57–66.
2. Федосеева Н. А., Загвоздкин М. В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9. С. 26–29.

3. Singh H. K., Singh A. K., Singh S. K. Profiling in Unmanned Aerial Vehicles: A Review // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2018. Vol. 91, iss. 1. P. 1–14.
4. Goh G. D., Agarwala S., Liang G. G., Dikshit V. Additive Manufacturing: An Overview of Current Research for Unmanned Aerial Vehicles // *Ref. Libr.* 2018. Vol. 63. P. 140–151.
5. Birnbaum Z., Dolgikh A., Skormin V. [et al.]. International Conference on Unmanned Aircraft Systems // *Ref. Libr.* 2015. P. 1310–1319.
6. Vlasov A. I., Juravleva L. V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices // *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2373. P. 072035.
7. US Patent 575330A. Hull Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography / Charles W. 1984.
8. Crump S. Apparatus and method for creating three dimensional objects, US Patent 5121329. 1989.
9. Murphy S., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs // *NatBiotechnol.* 2014. Vol. 32. P. 773–785.
10. Sokolov Yu. A., Pavlushin N. V., Kondrat'ev S. Yu. New additive technologies based on ion beams // *Russian Engineering Research*. 2016. Vol. 36. P. 1012–1016.
11. Sleptsov V. V., Savkin A. V., Trunova E. A. [et al.]. Electrosark dispersion in nanopowder production for additive technologies // *Russian Engineering Research*. 2019. Vol. 39. P. 133–136.
12. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis // *Chem-CatChem*. 2018. Vol. 10. P. 1512–1525.
13. Pandey R. Photopolymers in 3D printing applications. Arcada // *Degree Thesis Plastics Technology*. 2014. Vol. 51.
14. Власов А. И., Зонтьева Д. Е., Евдокимов В. С. [и др.]. Гибридная система управления малыми беспилотными летательными аппаратами // *Автоматизация. Современные технологии*. 2015. № 8. С. 15–24.
15. Лавров А. В., Курносенко А. Е., Андрусенко В. В., Солод А. Г. Использование динамических стендов при полунатурном моделировании систем беспилотных летательных аппаратов // *Технологии инженерных и информационных систем*. 2016. № 8-9 (206). С. 19–25.
16. Пиженков Е. Н., Подгорбунских В. М., Рошин В. А. Использование SLM технологий 3D печати в изготовлении деталей червячно-модульных фрез // *Современные условия взаимодействия науки и техники : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (11 ноября 2018 г., г. Пермь) : в 3 ч. Уфа : ОМЕГА САЙНС*. 2018. Ч. 2. С. 91–96.
17. Yin Z. N., Wang T. J. Deformation response and constitutive modeling of PC, ABS and PC/ABS alloys under impact tensile loading // *Materials Science and Engineering*. 2010. Vol. 526. P. 1461–1468.
18. Уланов А. О., Инышина Я. Г. PETG- и PLA-филаменты и испытания физико-механических характеристик изделий из них // *Молодой ученый*. 2020. № 52. С. 98–101.
19. Маркелов В. В., Власов А. И., Камышная Э. Н. Системный анализ процесса управления качеством изделий электронной техники // *Надежность и качество сложных систем*. 2014. № 1. С. 35–42.
20. Власов А. И., Григорьев П. В., Кривошеин А. И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 2. С. 26–35.

References

1. Lavrov A.V., Vlasov D.S. Methods and means of monitoring UAV characteristics in real time. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh system = Technologies of engineering and information systems*. 2019;(4):57–66. (In Russ.)
2. Fedoseeva N.A., Zagvozdkin M.V. Promising areas of application of unmanned aerial vehicles. *Nauchnyy zhurnal = Scientific Journal*. 2017;(9):26–29. (In Russ.)
3. Singh H.K., Singh A.K., Singh S.K. Profiling in Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2018;91(1):1–14.
4. Goh G.D., Agarwala S., Liang G.G., Dikshit V. Additive Manufacturing: An Overview of Current Research for Unmanned Aerial Vehicles. *Ref. Libr.* 2018;63:140–151.
5. Birnbaum Z., Dolgikh A., Skormin V. et al. International Conference on Unmanned Aircraft Systems. *Ref. Libr.* 2015:1310–1319.
6. Vlasov A.I., Juravleva L.V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2373:072035.
7. US Patent 575330A. *Hull Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. Charles W. 1984.
8. US Patent 5121329. *Apparatus and method for creating three dimensional objects*. Crump S. 1989.
9. Murphy S., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *NatBiotechnol.* 2014;32:773–785.
10. Sokolov Yu.A., Pavlushin N.V., Kondrat'ev S.Yu. New additive technologies based on ion beams. *Russian Engineering Research*. 2016;36:1012–1016.
11. Sleptsov V.V., Savkin A.V., Trunova E.A. et al. Electrosark dispersion in nanopowder production for additive technologies. *Russian Engineering Research*. 2019;39:133–136.

12. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis. *Chem-CatChem*. 2018;10:1512–1525.
13. Pandey R. Photopolymers in 3D printing applications. Arcada. *Degree Thesis Plastics Technology*. 2014;51.
14. Vlasov A.I., Zont'eva D.E., Evdokimov V.S. et al. Hybrid control system for small unmanned aerial vehicles. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern technologies*. 2015;(8):15–24. (In Russ.)
15. Lavrov A.V., Kurnosenko A.E., Andrusenko V.V., Solod A.G. The use of dynamic stands in semi-natural modeling of unmanned aerial vehicle systems. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh system = Technologies of engineering and information systems*. 2016;(8-9):19–25. (In Russ.)
16. Pizhenkov E.N., Podgorbunskikh V.M., Roshchin V.A. The use of SLM 3D printing technologies in the manufacture of worm-modular milling cutter parts. *Sovremennye usloviya vzaimodeystviya nauki i tekhniki: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (11 noyabrya 2018 g., g. Perm'): v 3 ch. = Modern conditions of interaction between science and technology : collection of the International Scientific and Practical Conference (November 11, 2018, Perm) : in 3 parts*. Ufa: OMEGA SAYNS. 2018;(part 2):91–96. (In Russ.)
17. Yin Z.N., Wang T.J. Deformation response and constitutive modeling of PC, ABS and PC/ABS alloys under impact tensile loading. *Materials Science and Engineering*. 2010;526:1461–1468.
18. Ulanov A.O., In'shina Ya.G. PETG- and PLA-filaments and tests of physical and mechanical characteristics of products made from them. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2020;(52):98–101. (In Russ.)
19. Markelov V.V., Vlasov A.I., Kamyshnaya E.N. System analysis of the quality management process of electronic equipment products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(1):35–42. (In Russ.)
20. Vlasov A.I., Grigor'ev P.V., Krivoshein A.I. Model of predictive maintenance of equipment using wireless sensor networks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(2):26–35. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Игоревич Власов

кандидат технических наук,
доцент кафедры проектирования
и технологии производства ЭА,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)
E-mail: vlasovai@bmstu.ru

Алексей Владимирович Гараев

студент,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)
E-mail: garaevalexei@yandex.ru

Валерия Олеговна Захарова

аспирант,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)
E-mail: valeriyashe@yandex.ru

Кирилл Владимирович Селиванов

кандидат технических наук,
доцент кафедры проектирования
и технологии производства ЭА,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)
E-mail: selivanov_kv@mail.ru

Andrey I. Vlasov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of design and technology of EA production,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Alexey V. Garaev

Student,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Valeria O. Zakharova

Postgraduate student,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Kirill V. Selivanov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of design and technology of EA production,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Денис Дмитриевич Чернышов

студент,

Московский государственный технический

университет имени Н. Э. Баумана

(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)

E-mail: saints@fan20012.ru

Denis D. Chernyshov

Student,

Bauman Moscow State Technical University

(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street,

Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 24.08.2023

Поступила после рецензирования/Revised 08.09.2023

Принята к публикации/Accepted 21.09.2023

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ САМОВОСТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

А. А. Рыжов¹, А. В. Лысенко², И. М. Рыбаков³, В. С. Мамонтов⁴, Н. К. Юрков⁵

¹ Пензенский научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

^{2, 3, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ pgufr@mail.ru, ² lysenko_av@bk.ru, ³ rybakov_im@mail.ru, ⁴ golden.aquarius@mail.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена специфика изготовления самовосстанавливающихся предохранителей на основе полимерной сшивки. *Материалы и методы.* Оценивается радиационное сшивание полимеров на фоне воздействия ионизирующего излучения с образованием поперечных химических связей между макромолекулами, приводящее к образованию пространственной сетки. *Результаты.* На основании исследования, анализа и проведенных работ была определена структурная схема специального технологического процесса изготовления самовосстанавливающихся предохранителей и его основные операции. *Выводы.* В процессе изготовления пробных образцов и опытных партий были отработаны специальные технологические процессы, такие как: пайка выводов к резистивным платам; изготовление резистивных плат; лазерная маркировка; контроль электрических параметров.

Ключевые слова: самовосстанавливающийся предохранитель, радиационное сшивание, полимерное сшивание, резистивные платы

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318>

Для цитирования: Рыжов А. А., Лысенко А. В., Рыбаков И. М., Мамонтов В. С., Юрков Н. К. К проблеме повышения надежности самовосстанавливающихся предохранителей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 111–118. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-10

TO THE PROBLEM OF INCREASING THE RELIABILITY OF SELF-REPAIRING FUSES

A.A. Ryzhov¹, A.V. Lysenko², I.M. Rybakov³, V.S. Mamontov⁴, N.K. Yurkov⁵

¹ Penza Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

^{2, 3, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia

¹ pgufr@mail.ru, ² lysenko_av@bk.ru, ³ rybakov_im@mail.ru, ⁴ golden.aquarius@mail.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* The specifics of manufacturing self-healing fuses based on polymer crosslinking are considered. *Materials and methods.* Radiation crosslinking of polymers is evaluated against the background of exposure to ionizing radiation with the formation of transverse chemical bonds between macromolecules, leading to the formation of a spatial grid. *Results.* Based on the research, analysis and work carried out, a block diagram of a special technological process for manufacturing self-healing fuses and its main operations was determined. *Conclusions.* During the production of test samples and experimental batches, special technological processes were worked out, such as: soldering of terminals to resistive boards; manufacturing of resistive boards; laser marking; control of electrical parameters.

Keywords: self-healing fuse, radiation crosslinking, polymer crosslinking, resistive boards

Financing: the research has been realized at the expense of the grant of the Russian Science Foundation the project № 22-29-20318, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20318>

For citation: Ryzhov A.A., Lysenko A.V., Rybakov I.M., Mamontov V.S., Yurkov N.K. To the problem of increasing the reliability of self-repairing fuses. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4): 111–118. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-10

Введение

При выполнении операции «Пайка выводов к резистивным платам», самовосстанавливающихся предохранителей (СВП) подвергается воздействию температуры, превышающей температуру фазовой трансформации в полимерно-углеродном композите. При этом происходит значительное увеличение сопротивления предохранителя, которое носит обратимый характер. С целью ускорения возврата сопротивления к первоначальному значению и дальнейшей стабильности величины сопротивления необходима термообработка изделий [1–3].

При изготовлении опытных образцов был применен следующий режим термообработки: выдержка при максимально допустимой рабочей температуре несколько часов, а также проведение операции «термоциклирование» – несколько циклов с чередованием температур.

При анализе всех зарубежных аналогов производители СВП в качестве токопроводящих электродов для равномерного распределения электрического потенциала по всей площади используют медные пластины [4–6].

Радиационная обработка

Сшитыми (сетчатыми) полимерами называются высокомолекулярные соединения, имеющие сложную макромолекулярную структуру, которая образует единую пространственную сетку [7]. Сшитый полиэтилен получается перекисом, силаном и радиацией. Первые два метода изготовления, в частности первый, приводят к образованию гидроперекисной группы в композитах, способствующей сильному окислению полиэтилена, и к значительным увеличению контактного сопротивления, недопустимого для СВП.

Далее одной из основных технических операций при изготовлении резисторов для использования в качестве СВП является радиационная сшивка полимер-углеродных композитов, которая позволяет стабилизировать основные технические параметры СВП, его механические и химические свойства.

Большое значение для осуществления радиационной сшивки имеет также способность свободной валентности макрорадикала или заряда макроиона к внутри- и межмолекулярной миграции. В кристаллических областях образуются связи между участками одной и той же молекулы (внутримолекулярные связи), а в аморфных – между соседними макромолекулами (межмолекулярные связи). Внутримолекулярные связи называют неэффективными, так как они не участвуют в образовании пространственной сетки. Вследствие этого радиационная сшивка высококристаллического полиэтилена (полиэтилена высокой плотности) протекает менее эффективно, чем полиэтилена низкой плотности [4].

Скорость радиационной сшивки зависит от температуры облучения, особенно в области перехода полимера из одного физического состояния во второе (температуру стеклования, плавления и др.). С повышением температур скорость распада макромолекул возрастает вследствие увеличения подвижности макроцепей [8–10].

Эффективность сшивки радиации оценивается количеством продольных связей, образованных в полимерах при поглощениях 100 эВ излучения [1].

В случае радиосшивки, если на полиэтиленовые связи воздействует поток электронов или лучей, они рвутся. Углерод обретает свободную связь и объединяет свободную связь в соседнюю молекулярную цепочку, создавая таким образом поперечные межмолекулярные связи на аморфном участке. Относительное число образуемых поперечных соединений в единицу объема полипропилена определяется «степенью сцепления» – это отношения массы полипропилена, охваченного трехмерными соединениями, к общей массе полипропилена.

По сравнению с другими способами сшивки полимеров радиационная сшивка не требует «вещественного» агента сшивки, это позволяет получить полимеры, которые обладают улучшенной комплексностью электрических, физических и механических свойств. На практике чаще всего используется радиационная сшивка полиэтилена – например, чтобы получить нагревостойкую электроизоляцию, химически стойкий упаковочный материал.

Когда деформируется сшитый полиэтилен, поливинилденфторид и другие частично кристаллические полимеры, пространственные сетки испытывают напряжение, под воздействием которого система стремится вернуться в равновесие [11]. Такое явление, называемое эффектом памяти, используется при изготовлении полиэтиленовых термоусадочных пленок, пластин, листов.

При проведении сшивки, было выявлено, что величина поглощенной дозы влияет в первую очередь на величину скачка сопротивления самовосстанавливающегося предохранителя при фазовой трансформации, происходящей в теле СВП.

На рис. 1 приведена зависимость «позисторного эффекта» на образцах СВП, выполненная для исследований и анализа.

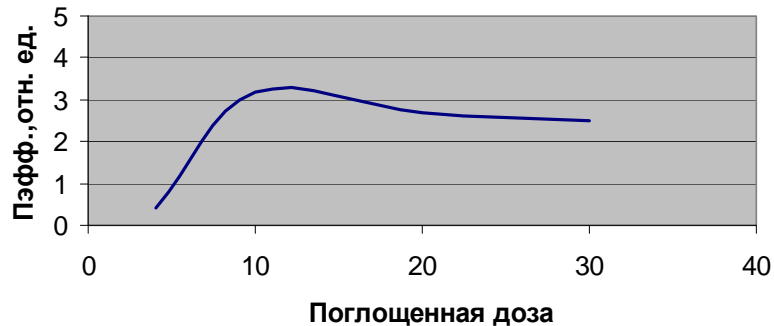


Рис. 1. Зависимость «позисторного эффекта» от величины поглощенной дозы γ – излучения

На основании представленных данных многочисленной патентной информации, оптимальной дозой облучения следует считать величину порядка 5–50 Мрад, достаточной для обеспечения оптимальных физико-механических характеристик и сохранения «позисторного эффекта».

Изготовление резистивных плат

Лучшим способом формирования электродов для токопровода является горячая прессовка медного волокна на полимерных углеродных композитах. Процессом является укладывание заготовки из медной фольги в разогретой пресс-форме. Диск из КПУ (композит полимерно-углеродный) помещается на него и сверху кладется вторая фольга. Пресс-форма устанавливается в нагретый гидравлический пресс, который сжимает пресс-форму, создавая давление на диск, и затем пресс-форма охлаждается без снятия нагрузки. Далее заготовка с опрессованными электродами изымается из пресс-формы и разрезается на резистивные платы.

Общий внешний вид заготовок с опрессованными электродами и нарезанные резистивные платы изображены на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Общий внешний вид заготовок

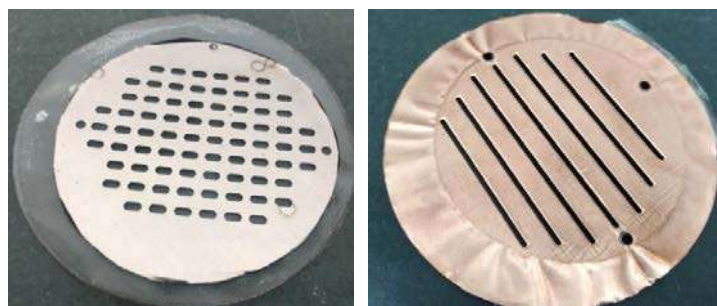


Рис. 3. Внешний вид заготовок с опрессованными электродами

Для хорошего сцепления токопроводящих электродов с полимерно-углеродным композитом и получения горячим прессованием качественных заготовок без вздутий и отслоений необходимо использовать медную фольгу с односторонним адгезионным слоем – высокоразвитой шероховатостью.

Пайка выводов к резистивной плате

Для установки СВП электронной аппаратуры на токопроводящие электроды резисторной платы прилагаются выводы разных конфигураций по конструкции.

Благодаря специальным свойствам полимерного и углеродного композита его длительное перегревание не допускается [12, 13]. Таким образом, традиционные приемы пайки при пайке паяльника и окунания в припойный расплав в этом случае недопустимы, поскольку температура паяльника и припойного расплава в ванне для пайки должна составлять не более 250 °С. В процессе исследования видов внешней пайки подходящий был выбран способ внешней пайки с помощью припойной пасты.

Паста для пропитки наносится на поверхности смазанных поверхностей толщиной не более 1 мм, а затем соединяется и кратковременно нагревается на приспособление для пропитки выводов на несколько минут. Инструмент для пайки приведен на рис. 4.



Рис. 4. Приспособление для пайки выводов

Клей расплавляется при нагревании, обеспечивая надежное соединение деталей. С учетом того, что процесс синтеза является относительно коротким и протекает при температурах, не превышающих 250 °С, этот метод крепления клеем к плате сопротивления используется для создания СВП.

В результате изучения и исследования методов пайки для КПУ был разработан технологический процесс на пайку выводов к резистивным платам.

Контроль электрических параметров

При производстве СВП особое значение имеет метрологическое обеспечение измерения их электрических параметров.

В табл. 1 приведены основные электрические параметры СВП, подлежащие контролю в процессе их изготовления.

Таблица 1

Основные электрические параметры СВП

Наименование параметра	Буквенное обозначение	Допускаемые границы	
		не менее	не более
Номинальное сопротивление, Ом	$R_{ном}$	0,05	5,00
Ток удержания, А	$I_{уд.}$	0,10	3,40
Ток размыкания, А	$I_{разм.}$	0,20	6,80
Максимальное время размыкания, с	$t_{ср}$	0,02	25,00

Для измерения некоторых параметров, например, номинального сопротивления, могут быть выбраны соответствующие средства измерения, которые удовлетворяют заданным требованиям.

Однако к СВП предъявляются некоторые особые требования, такие как ток удержания, ток размыкания и время размыкания [7]. Эти параметры могут быть измерены с помощью многофункционального измерителя времени срабатывания, который позволяет измерять параметры воздействия СВП на ток удержания, время отключения при воздействии тока размыкания и пятикратное превышение тока удержания.

Схема установки измерения времени работы приведена на рис. 6.

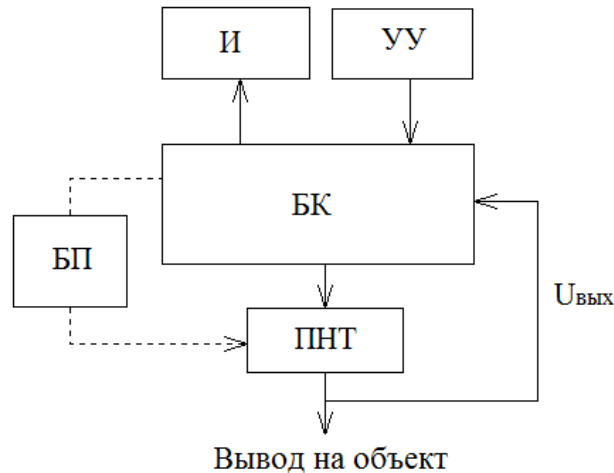


Рис. 6. Структурная схема установки для измерения времени срабатывания:
 БК – блок комбинированный; ПНТ – преобразователь напряжения в ток;
 БП – блок питания; И – индикатор; УУ – устройство управления

Принцип действия схемы следующий. Благодаря устройству управления (УУ) оператор выбирает режимы для задания максимальной мощности и тестовой мощности. Напряжение и ток могут быть скорректированы клавишами при помощи индикатора (И). В соответствии с заданным значением тока комбинированный блок (БК) создает напряжение, преобразуемое преобразователем напряжения в напряжение ПНТ, подавленное на контролируемом резисторе.

В то же время значение напряжения на СВП постоянно контролируется до тех пор, пока не будет достигнут максимальный уровень.

Время действия размыкания характеризуется интервалом между моментом передачи тестового тока на СВП, а также моментом того, как на резистор достигается падение напряжения, соответствующего заданному максимуму.

Результаты измерения времени работы отображаются в индикаторе разрешающей способности до 0,001 с. Предел допускает абсолютную ошибку измерения времени работы:

- в диапазоне 0,001–1 с равен $\pm 0,005$ с;
- в диапазоне 1–20 с равен $\pm 0,5$ с;
- в диапазоне 20–100 с равен ± 1 с.

СВП, выдержавшие отбраковочные испытания, передаются на контроль величины сопротивления. Если сопротивление после испытаний не превышает ± 3 % от номинального диапазона сопротивлений, СВП считаются годными [4].

Поведенческая модель СВП

В ходе выполнения работы была разработана поведенческая модель изделия и описана логика его функционирования для использования в системах автоматизированного проектирования.

При разработке поведенческих моделей учтены предпочтительные типы и версии электронных моделей для изделий ЭКБ, применяемые в системах проектирования аппаратуры, для аналоговых и пассивных изделий – модели *SPICE*. Библиотечный вариант состоит из следующих составных частей:

- 1) условное графическое обозначение (УГО);
- 2) посадочное место (Footprint);
- 3) 3D-модель изделия.

В программе создано УГО для всех вариантов исполнения СВП. Было разработано условное графическое обозначение элемента.

Предпочтительные САПР: *MicroCap, Aldec Active VHDL, CST Studio, Modelsim, Altium Designer, ADS, AWR Design Environment*.

Были разработаны посадочные места и 3D-модели элементов для различных вариантов исполнения СВП.

Была проведена верификация разработанных моделей, заключающаяся в разработке и проверке корректности получаемых посадочных мест и 3D-моделей.

Также были обозначены пределы применимости поведенческой модели. Модель предназначена для использования в программном пакете Altium Designer для разработки схем электрических принципиальных печатных плат, включая подготовку к производству, моделированию низкочастотных параметров (*SPICE*-модель). Кроме того, моделирование может выполняться в пакете *MicroCAP*.

Далее определяем зависимости времени срабатывания предохранителей от тока перегрузки и тока удержания от температуры окружающей среды.

Измерение зависимости тока удерживающего резистора от температуры в окружающей среде осуществляется с помощью включения схемы, представленной на рис. 7.

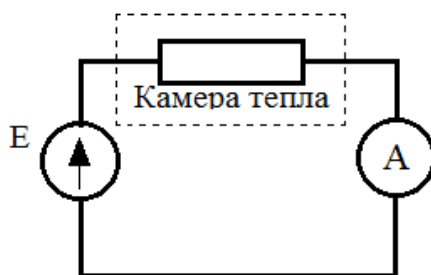


Рис. 7. Схема для снятия температурной зависимости

Заключение

Был произведен анализ и исследование видов сшивки полимеров, выбран наиболее подходящий – радиационная сшивка. Подобраны режимы, необходимая доза облучения и время.

При изготовлении опытных образцов был применен следующий режим термообработки: выдержка при максимально допустимой рабочей температуре несколько часов, а также проведение операции «термоциклирование» – несколько циклов с чередованием температур. Выполнив операции с экспериментальными образцами, можно сделать вывод, что операции термообработки и термоциклирования необходимы для наших образцов для стабилизации технических параметров.

Для хорошего сцепления токопроводящих электродов с полимерно-углеродным композитом и получения горячим прессованием качественных заготовок без вздутий и отслоений, необходимо использовать медную фольгу с односторонним адгезионным слоем – высокоразвитой шероховатостью.

Благодаря особым свойствам полимерно-углеродных композиционных материалов ему не разрешается перегреваться в течение длительного времени. Следовательно, традиционный метод пайки клеммы паяльником или погружения в расплав припоя в данном случае неприемлем, поскольку температура наконечника паяльника или расплава припоя в паяльной ванне должна составлять не менее 250 °С.

В процессе изучения видов пайки внешних выводов подходящим был выбран метод пайки припойными пастами. В результате изучения и исследования методов пайки для КПУ был разработан технологический процесс на пайку выводов к резистивным платам.

Список литературы

1. Каминская Т. П., Подшибякин С. В. Сшивка полимерно-углеродных композитов для самовосстанавливающихся предохранителей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. 2. С. 143–144.
2. Yurkov N. K., Grishko A. K., Lysenko A. V. [et al.]. Intellectual method for reliability assessment of radio-electronic means // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018. 2018. P. 105–112.
3. 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. 2016. P. 416–418. doi: 10.1109/SCM.2016.7519798
4. Домкин К. И. Влияние сшивки на электрофизические свойства самовосстанавливающихся предохранителей // Ломоносов-2011 : материалы Междунар. молодежного научного форума / отв. ред. А. И. Андреев, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, М. В. Чистякова. М. : МАКС Пресс, 2011.

5. Белов А. Г., Баннов В. Я., Трусов В. А. [и др.]. Влагозащитное покрытие печатных узлов в датчике утечки воды // *Современные информационные технологии*. 2014. № 19. С. 265–272.
6. 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.
7. Каминская Т. П., Недорезов В. Г., Домкин К. И., Шлыкова Л. А. Полимерные самовосстанавливающиеся предохранители в чип исполнении // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2009. Т. 2. С. 197–198.
8. 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.
9. Юрков Н. К., Затылкин А. В., Полесский С. Н. [и др.]. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2014. Т. 1. С. 184–187.
10. Лысенко А. В. Анализ современных систем управления проектами // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2012. Т. 1. С. 371–372.
11. Домкин К. И., Каминская Т. П., Миронова Н. Д. Электрические характеристики самовосстанавливающихся предохранителей // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2008. Т. 2. С. 156–158. EDN: NDPRGZ
12. Ергалиев Д. С., Зуев Д. В., Кочетков А. А. Моделирование и расчет зубчатого соединения для универсального устройства замера тяги винта беспилотного летательного аппарата // *Надежность и качество сложных систем*. 2022. № 4. С. 76–81.
13. Горячев Н. В., Лысенко А. В., Граб И. Д., Юрков Н. К. Программа инженерного расчета температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2012. Т. 2. С. 242–243.

References

1. Kaminskaya T.P., Podshibyakin S.V. Crosslinking of polymer-carbon composites for self-healing fuses. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;2:143–144. (In Russ.)
2. Yurkov N.K., Grishko A.K., Lysenko A.V. et al. Intellectual method for reliability assessment of radio-electronic means. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018*. 2018:105–112.
3. 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*. 2016:416–418. doi: 10.1109/SCM.2016.7519798
4. Domkin K.I. The effect of crosslinking on the electrophysical properties of self-healing fuses. *Lomonosov-2011: materialy Mezhdunar. molodezhnogo nauchnogo foruma = Lomonosov-2011 : materials of the International Journal. youth Scientific Forum*. Moscow: MAKS Press, 2011. (In Russ.)
5. Belov A.G., Bannov V.Ya., Trusov V.A. et al. Moisture-proof coating of printed components in a water leakage sensor. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2014;(19):265–272. (In Russ.)
6. Yurkov N.K., Zatylnkin A.V., Poleskiy 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.)
7. Kaminskaya T.P., Nedorezov V.G., Domkin K.I., Shlykova L.A. Polymer self-healing fuses in chip execution. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2009;2:197–198. (In Russ.)
8. 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 vibrational displacement 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.)
9. Yurkov N.K., Zatylnkin A.V., Poleskiy S.N. et al. A functional model of information technology for ensuring reliability of complex electronic systems taking into account external influences. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;1:184–187. (In Russ.)
10. Lysenko A.V. Analysis of modern project management systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;1:371–372. (In Russ.)
11. Domkin K.I., Kaminskaya T.P., Mironova N.D. Electrical characteristics of self-repairing fuses. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;2:156–158. (In Russ.). EDN: NDPRGZ

12. Ergaliev D.S., Zuev D.V., Kochetkov A.A. Modeling and calculation of a toothed joint for a universal device for measuring the thrust of an unmanned aerial vehicle propeller. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):76–81. (In Russ.)
13. Goryachev N.V., Lysenko A.V., Grab I.D., Yurkov N.K. The program of engineering calculation of the overheating temperature of the crystal of an electric radiocomponent and its heat sink. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;2:242–243. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Алексеевич Рыжов

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
по научно-техническому развитию,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: pgufr@mail.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: lysenko_av@bk.ru

Илья Михайлович Рыбаков

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

Виталий Сергеевич Мамонтов

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

Николай Кондратьевич Юрков

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

Aleksander A. Ryzhov

Candidate of technical sciences, deputy director general
for scientific and technical development,
Penza Scientific Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(44 Karakozov 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)

Ilya M. Rybakov

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

Vitaliy S. Mamontov

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

Nikolay K. Yurkov

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

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

Поступила в редакцию / Received 20.08.2023

Поступила после рецензирования / Revised 05.09.2023

Принята к публикации / Accepted 21.09.2023

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Е. А. Данилова¹, Н. С. Алмашкина², И. М. Рыбаков³

^{1,2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ siori@list.ru, ² nadezhda_poteshkina@mail.ru, ³ rybakov_im@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* 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. *Материалы и методы.* В статье рассмотрены такие методы обработки и анализа статистических данных по технологическим дефектам, как построение диаграммы Исикавы, диаграммы Парето, а также ABC-анализ. Применение данных методов позволило выявить основные виды дефектов печатных плат по данным предприятия-изготовителя. *Результаты.* Приведены результаты оценки качества печатных плат статистическими методами анализа. Предложена классификация технологических дефектов печатных плат и сформулированы возможные причины их возникновения. *Выводы.* Рекомендуемый порядок мониторинга технологических дефектов печатных плат позволит повысить качество выпускаемой продукции за счет выявления и устранения причин, приводящих к его максимальному снижению. Также приведены основные направления работы в области повышения качества, позволяющие устранить причины наиболее значимых дефектов печатных плат.

Ключевые слова: печатная плата, дефект, технологический процесс, контроль качества, математико-статистические методы, диаграмма Парето

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318>

Для цитирования: Данилова Е. А., Алмашкина Н. С., Рыбаков И. М. Применение статистических методов оценки надежности печатных плат // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 119–129. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-11

APPLICATION OF STATISTICAL METHODS EVALUATION OF THE RELIABILITY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

E.A. Danilova¹, N.S. Almashkina², I.M. Rybakov³

^{1,2,3} Penza State University, Penza, Russia
¹ siori@list.ru, ² nadezhda_poteshkina@mail.ru, ³ rybakov_im@mail.ru

Abstract. *Background.* In modern electronic equipment, printed circuit boards are the main component and play an important role in combining all electronic elements to perform the specified functions of the device. The process of producing printed circuit boards is quite complex and includes several stages, each of which consists of a specific set of works. The occurrence of technological defects is possible at any stage and is associated with production conditions, equipment, materials, qualification of staff, etc. Therefore, taking into account and analyzing all emerging defects for timely changes and adjustments to the technological process of printed circuit board production in order to prevent the release of low-quality products become especially important. *Materials and methods.* The article discusses such methods of processing and analyzing statistical data on technological defects as constructing Ishikawa's diagrams, Pareto's diagrams, and ABC analysis. The application of these methods made it possible to identify the main types of defects in printed circuit boards according to the manufacturer's data. *Results.* The results of evaluating the quality of printed circuit boards using statistical methods of analysis are presented. A classification

of technological defects in printed circuit boards is proposed and possible causes of their occurrence are formulated. *Conclusions.* The recommended procedure for monitoring technological defects of printed circuit boards will improve the quality of products by identifying and minimizing the causes leading to its maximum reduction. The main directions of work in the field of quality improvement are also given, allowing to eliminate the causes of the most significant defects of printed circuit boards.

Keywords: printed circuit board, defect, technological process, quality control, mathematical and statistical methods, Pareto diagram

Financing: the research has been realized at the expense of the grant of the Russian Science Foundation the project № 22-29-20318, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20318>

For citation: Danilova E.A., Almashkina N.S., Rybakov I.M. Application of statistical methods evaluation of the reliability of printed circuit boards. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):119–129. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-11

Введение

Одной из основных функций управления качеством является контроль. Его значение заключается в возможности выявления несоответствий с последующим оперативным их исправлением с минимальными потерями для производства.

Контроль качества осуществляется путем сравнения запланированных показателей качества с их действительными значениями, т.е. необходимо проверить показатели качества, сравнить их и найти отклонение от запланированных значений. В случае обнаружения отклонений необходимо установить причину их появления, провести корректировку показателей качества и повторно проверить соответствие скорректированных показателей качества их запланированным значениям.

Требования к качеству устанавливаются и фиксируются в нормативных (НД) и нормативно-технических документах (НТД).

Отклонение качества продукции от заданных параметров происходит, как правило, в сторону ухудшения и имеет как общие, так и частные проявления. К числу общих относятся моральный износ, физическое и моральное старение продукции, т.е. потеря первоначальных свойств при эксплуатации. Частные отклонения качества от установленных требований чрезвычайно разнообразны и обусловлены уже не экономической и технологической природой, а условиями внешнего характера: нарушение правил эксплуатации; ошибки разработчиков и/или изготовителей; нарушения производственной дисциплины; дефекты оборудования.

Таким образом, можно сделать вывод, что качество продукции находится в постоянном движении и представляет собой неустойчивый объект, требующий контроля. Научной основой современного технического контроля является математико-статистические методы [1].

Классификация технологических дефектов ПП

На всех современных предприятиях ведется статистика изготовления печатных плат (ПП). Также регистрируется количество бракованных изделий и происходит анализ возможных причин возникновения брака. Анализируя опыт работы предприятий, выпускающих ПП, по данным из открытых источников, можно выделить наиболее часто встречающиеся виды технологических дефектов и сформулировать возможные причины их возникновения (табл. 1) [2–4].

Таблица 1

Дефекты ПП и их возможные причины

Дефект	Причина
1	2
Непропрессовка	Изначально выбран некачественный материал Неправильное хранение материалов Использовалась склеивающая прокладка с истекшим сроком годности Использовалась склеивающая прокладка с низким содержанием смолы Некачественная подготовка слоев перед прессованием Нарушение режимов прессования Недостаточно отработанный процесс прессования Запыленность производственных помещений

1	2
Погрешности фотошаблона	Несоответствие рисунка схемы на фотошаблоне проектному заданию Несоответствие геометрических размеров элементов рисунка на фотошаблоне Изначально выбран некачественный материал Неправильное хранение материалов Неправильное хранение готовых фотошаблонов (температура и влажность нестабильны, присутствуют высокие перепады) Неправильно выбраны режимы обработки фотопленки Отсутствует/нарушена вакуумная гигиена (чистые помещения) На поверхностях стоек и полок, предназначенных для работы с фотопленкой, присутствуют заусенцы и/или неровности, которые могут поцарапать эмульсию фотопленки Запыленность производственных помещений
Смещение слоев	Неоднородность склеивающего материала Изначально выбран некачественный материал Нарушение режимов прессования Недостаточно отработанный процесс прессования Неправильное хранение материалов Погрешность базирования при сборке пакета для прессования Недостаточное число фиксирующих штырей Сдвиг слоя в момент перехода от нулевого к полному давлению
Замыкание электрических цепей	Некачественное травление Смещение слоев при прессовании Деформация диэлектрических оснований Неправильное базирование ПП при выполнении отверстий Низкое качество стеклотекстолита Малое расстояние между элементами печатного монтажа Запыленность производственных помещений
Погрешность сверления	Затупленное сверло Искажение геометрии сверла Изначально выбран некачественный материал Погрешности фотошаблона Не отработана технология сверления При сверлении используется более одной МПП в стопе Неправильно выбраны режимы обработки
Дефекты лужения	Изначально выбран некачественный материал Неправильное хранение материалов Не отрегулированы воздушные ножи в установке (угол положения и зазор) Недостаточно отработанный процесс горячего лужения Плохое качество припоя Нарушение технологических режимов
Дефекты металлизации	Нарушена концентрация растворов в ваннах Недостаточно отработанный процесс Некачественное сверление (при дефектах металлизации в отверстиях) Запыленность производственных помещений Нарушение технологических режимов Изначально выбран некачественный материал

Сбор данных о видах и количестве технологических дефектов позволит своевременно организовать корректировку технологических процессов и условий производства с целью недопущения выпуска изделий низкого качества [5].

Обработка и анализ статистических данных на примере диаграммы Исикавы

В каждом производственном процессе на протяжении всего цикла могут возникать определенные препятствия и проблемы, истинную причину появления которых установить удастся не всегда. Для определения основных причин возникновения проблем (препятствий, трудностей) удобно прибегнуть к использованию диаграммы Исикавы (диаграмма «рыбьей кости», причинно-следственная диаграмма, диаграмма анализа корневых причин).

Диаграмма Исикавы – это графическое представление причин и результатов, по которому можно выявить, исследовать, определять и анализировать основные и вспомогательные причины возникновения нежелательных факторов и условий, вызывающих отклонения качества продукции [6, 7].

На рис. 1 показана диаграмма Исикавы, которая используется для анализа качества ПП на предприятии. При составлении диаграммы важно выявить максимальное число факторов, оказывающих влияние и даже просто имеющих отношение к возможному браку ПП. Эффективным и простым в реализации методом сбора данных является групповой метод, или мозговой штурм.

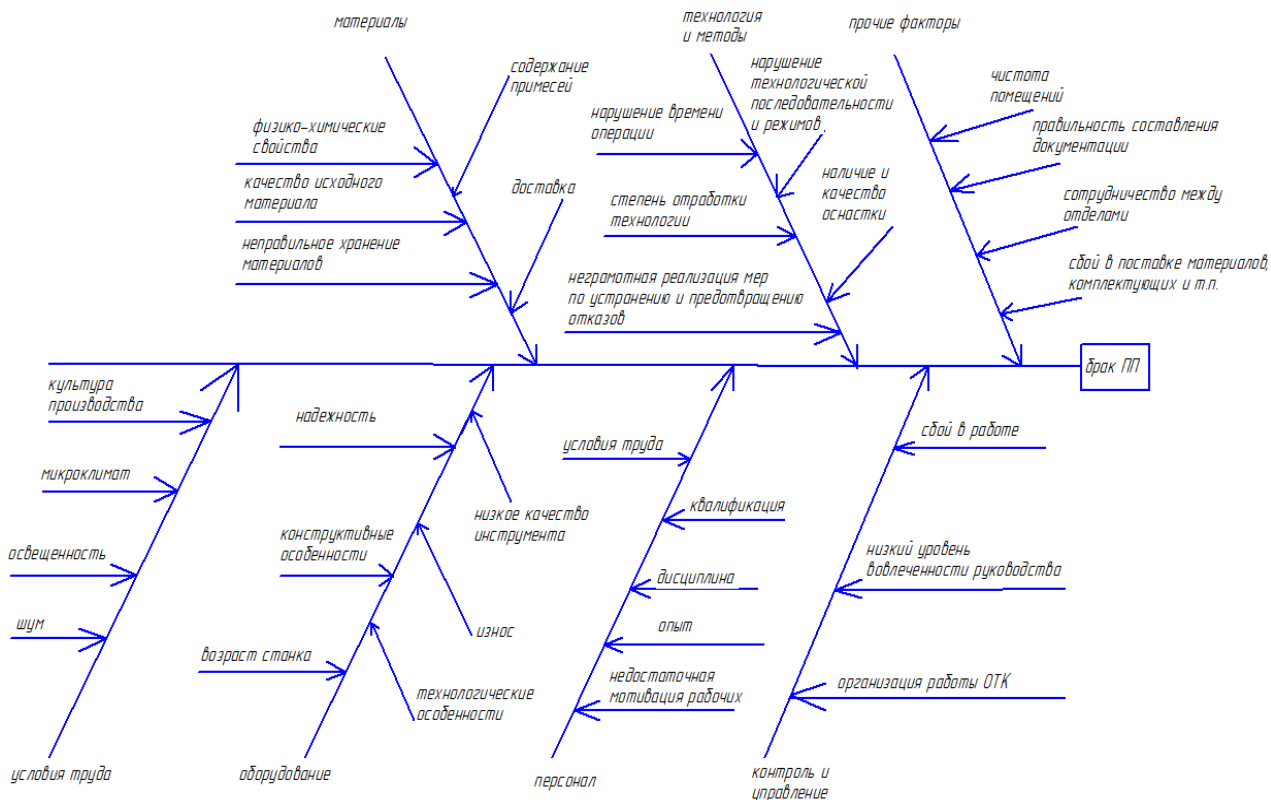


Рис. 1. Диаграмма Исикавы

При построении диаграммы Исикавы необходимо задать вопрос «Почему?» к возникшей проблеме, тогда можно выявить причины первого порядка. Затем задать вопрос «Почему?» к каждой причине первого порядка, тогда можно выявить причины второго порядка.

При проведении мозгового штурма выявляются различные причины, влияющие на брак изделий.

К причинам первого порядка были отнесены материалы, оборудование, технология и методы, условия труда, персонал, контроль, управление и прочие факторы.

На причины первого порядка непосредственное влияние оказывают причины второго порядка, а именно: физико-химические свойства материалов, содержание примесей, исходное качество материалов, неправильное хранение материалов, доставка материалов; нарушение времени операции, степень отработки технологии, неграмотная реализация мер по устранению и предотвращению отказов, нарушение технологической последовательности и режимов, наличие и качество оснастки; чистота помещений, правильность составления документации, сотрудничество между отделами, сбой в поставке материалов и комплектующих; культура производства, микроклимат, освещенность, шум; надежность оборудования и его конструктивные особенности, возраст станка, низкое качество инструмента, износ, технологические особенности; условия труда, квалификация персонала, дисциплина, опыт персонала, недостаточная мотивация рабочих; низкий уровень вовлеченности руководства, сбой в работе, организация работы ОТК.

Зачастую предприятия оснащены различным дорогостоящим высокоточным оборудованием, однако количество единиц оборудования – не гарантия бездефектного производства. Важно, чтобы

оборудование было работоспособным именно на конкретном предприятии, чтобы использовалось в полной мере и не простаивало. Немаловажно уделить внимание и применяемой оснастке, средствам контроля и измерений, как ответственно и своевременно проходит их поверка и ее сроки; а также условиям труда, мотивации сотрудников, чистоте помещений. Если в производственных помещениях нарушен микроклимат (отсутствие кондиционеров в летнее время или некачественное отопление помещений в зимний период), шум, плохая освещенность и прочее, то работники будут испытывать большую утомляемость, что впоследствии может стать причиной невнимательности и привести к появлению дефектов. Важной составляющей при изготовлении качественной продукции является чистота производственных помещений и соблюдение требований к средствам индивидуальной защиты (СИЗ). Запыленность цехов, неудовлетворительное межоперационное хранение деталей, некорректное использование технологической одежды: халат, перчатки, шапочка, бахилы (особенно в чистых помещениях) или ее отсутствие, является причиной возникновения дефектов изделий на разных стадиях технологического процесса.

Особо следует выделить группу «прочие факторы», которая необходима для регистрации факторов, не связанных с причинами первого порядка, но важных для анализа процесса в целом.

Обработка и анализ статистических данных на примере диаграммы Парето

Анализ проводился на основе годовых данных выпуска ПП на предприятии. В табл. 2 и на рис. 2 представлены данные о распределении заказов по видам ПП за год для отлаженного производства. Предприятие выпускает все виды ПП, а именно односторонние (ОПП), двусторонние (ДПП), многослойные (МПП) и гибкие ПП (ГПП).

Таблица 2

Распределение заказов по видам ПП за год

Обозначение печатных плат	Количество печатных плат в год, шт.	Доля печатных плат от общего количества, %
ОПП	120	2,6
ДПП	1340	29,8
МПП	2780	61,8
ГПП	260	5,8
Итого	4500	100

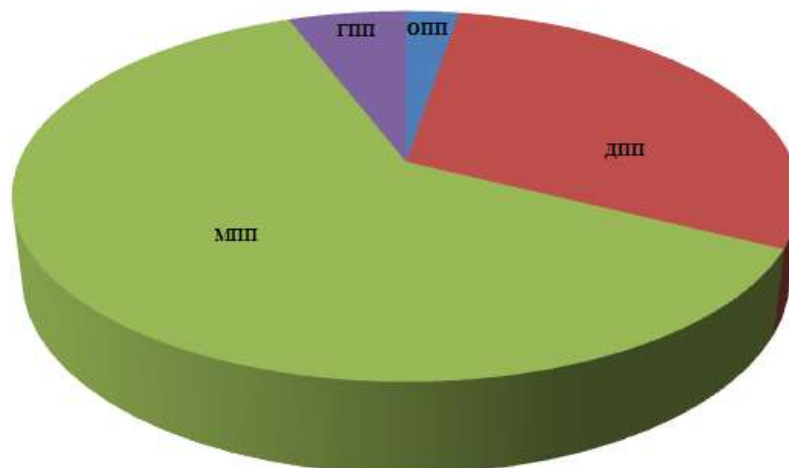


Рис. 2. Распределение заказов по видам ПП за год

На разных стадиях технологического процесса изготовления ПП могут возникать различного рода технологические дефекты [8, 9]. При обнаружении дефектов данные фиксируются и проводится отнесение дефекта к одному из видов (классификация) (табл. 3). Затем строятся специальные диаграммы (рис. 3), позволяющие выявить наиболее повторяющиеся дефекты, установить периодичность их появления и более детально провести анализ причин возникновения [10].

Таблица 3

Распределение дефектов ПП за прошедший период по кварталам

Вид дефектов	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Общее за год
Непропрессовка	22	15	11	21	69
Погрешности фотошаблона	19	13	19	14	65
Замыкание электрических цепей	11	14	17	15	57
Дефекты металлизации	8	14	10	7	39
Погрешность сверления	4	8	6	9	27
Смещение слоев	6	4	2	5	17
Дефекты лужения	1	3	1	2	7
Коробление ПП	3	2	1	0	6
Итого	74	73	67	73	287

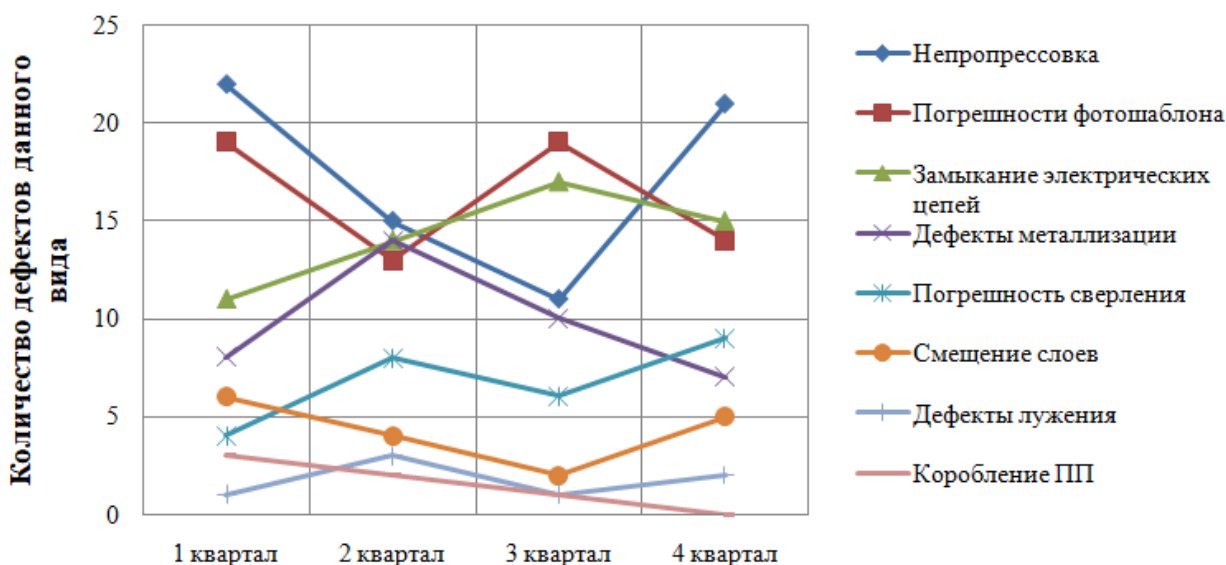


Рис. 3. Распределение дефектов по кварталам

По результатам анализа диаграмм выявлено, что основными видами дефектов ПП за прошедший период являются: непропрессовка, погрешности фотошаблона, смещение слоев, замыкание электрических цепей, погрешность сверления, дефекты лужения, дефекты металлизации, коробление ПП. Причем наличие сильных причинно-следственных связей между обнаруженными дефектами не установлено (значение коэффициента корреляции не превышает 0,27, что говорит об умеренной связи между данными).

Построение диаграммы Парето осуществляется на основе данных табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные для построения диаграммы Парето

Вид дефектов	Число дефектов	Накопленная сумма дефектов	Дефекты в общей сумме, %	Накопленный процент дефектов, %	Группа
Непропрессовка	69	69	24,04	24,04	А
Погрешности фотошаблона	65	134	22,65	46,69	
Замыкание электрических цепей	57	191	19,86	66,55	
Дефекты металлизации	39	230	13,59	80,14	В
Погрешность сверления	27	257	9,4	89,54	
Смещение слоев	17	274	5,92	95,46	С
Дефекты лужения	7	281	2,44	97,9	
Коробление ПП	6	287	2,1	100	
Итого	287	-	100	-	-

В первой графе приведены наименования видов дефектов, упорядоченные по убыванию числа их появлений. Во второй графе приведено количество дефектов данного вида за год. Третья графа «Накопленная сумма дефектов» получается путем суммирования количества выявленных дефектов соответствующего вида с накопленной суммой предыдущей строки. Накопленную сумму дефектов рассчитывают со второй строки, последовательно наращивая последующие строки значением предыдущей строки. Аналогично выполнить расчеты по остальным видам дефектов. В четвертой графе рассчитывается процент дефектов данного вида от общей суммы дефектов. Данные в пятой графе представляют собой кумулятивную долю дефектов, на основании которой и строится кривая Лоренса.

Диаграмма Парето – инструмент визуализации данных, с помощью которого проводится анализ дефектов, и определяются наиболее значимые причины, приводящие к возникновению данных дефектов [11]. Методика построения диаграммы реализует принцип 20/80. В приложении к анализу дефектов ПП он может быть сформулирован следующим образом: 80 % дефектов обусловлены 20 % причин. Таким образом, установление основных причин возникновения дефектов и принятые меры к их устранению позволят значительно повысить качество выпускаемых ПП.

Построение диаграммы Парето (рис. 4) осуществляется в два этапа. Сначала строится столбчатая диаграмма, высота столбцов которой соответствует числу дефектов данного вида (графа 2 табл. 4). Далее на диаграмме проводится кумулятивная кривая, отражающая накопленный процент дефектов (графа 5 табл. 4).

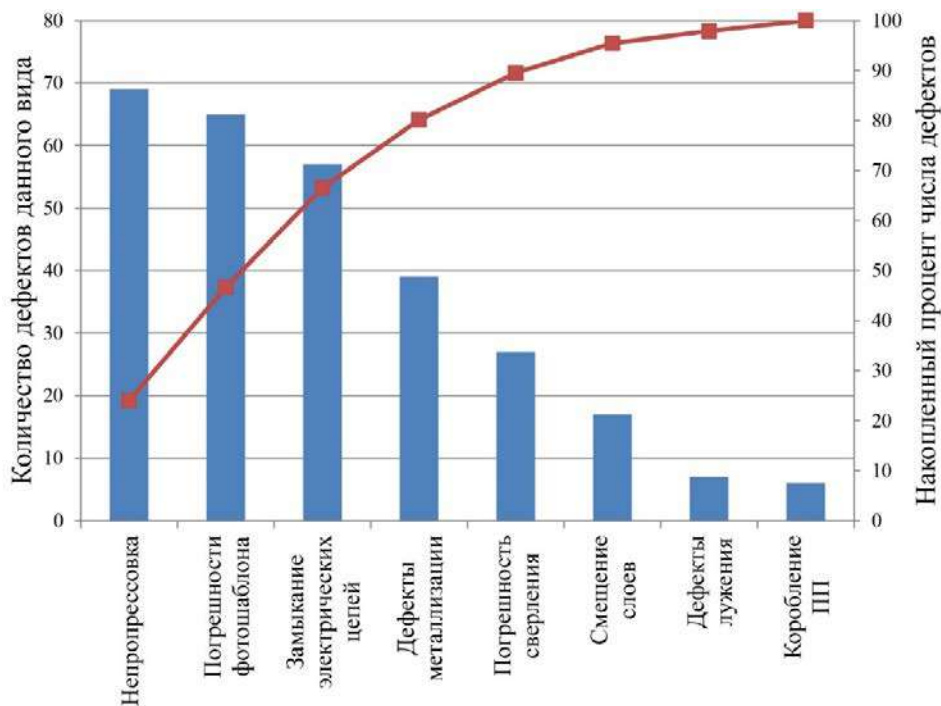


Рис. 4. Диаграмма Парето

После построения диаграммы Парето для выявления дефектов необходимо определиться и с причинами их возникновения. Одним из наиболее распространенных методов разделения факторов на степени влияния является АВС-анализ. Метод заключается в разбиении всей совокупности дефектов на три группы в порядке убывания суммы потерь и их значимости для достижения качества продукции [12].

Пользуясь классической пропорцией разбиения «80/15/5», распределим дефекты по частоте их появления (количеству дефектов данного вида) на группы:

- группа А – наиболее важные существенные проблемы, на которые в сумме приходится 80,14 % (непропрессовка, погрешности фотошаблона, замыкание электрических цепей, дефекты металлизации);
- группа В – причины, которые в сумме имеют 15,32 % (погрешность сверления, смещение слоев);
- группа С – причины, на которые приходится 4,54 % (дефекты лужения, коробление ПП).

Таким образом, выявление и устранение причин группы А имеет больший приоритет, а связанные с ними мероприятия самую высокую эффективность. Реализация данных мероприятий приведет к снижению выпуска некачественных ПП более чем на 80 %, т.е. к максимальному снижению брака.

На основании табл. 1 можно выделить общие причины возникновения дефектов ПП: запыленность производственных помещений; выбор изначально некачественного материала, неправильное хранение материалов, нарушение технологических режимов обработки, а также несоблюдение правил межоперационного хранения заготовок, неиспользование средств индивидуальной защиты (перчатки, шапочка), нарушение микроклимата производственных помещений (температура, влажность).

Анализ дефектов группы А показал, что общими причинами, приводящими к их возникновению, являются нарушения технологических режимов изготовления печатных плат, запыленность производственных помещений, а также качество исходных материалов (табл. 5).

Таблица 5

Распределение дефектов группы А по причинам

Дефект	Нарушение технологических режимов	Запыленность производственных помещений	Исходные материалы
Непропрессовка	9	10	7
Погрешности фотошаблона	5	15	3
Замыкание электрических цепей	7	4	1
Дефекты металлизации	3	3	6
Итого	24	32	17

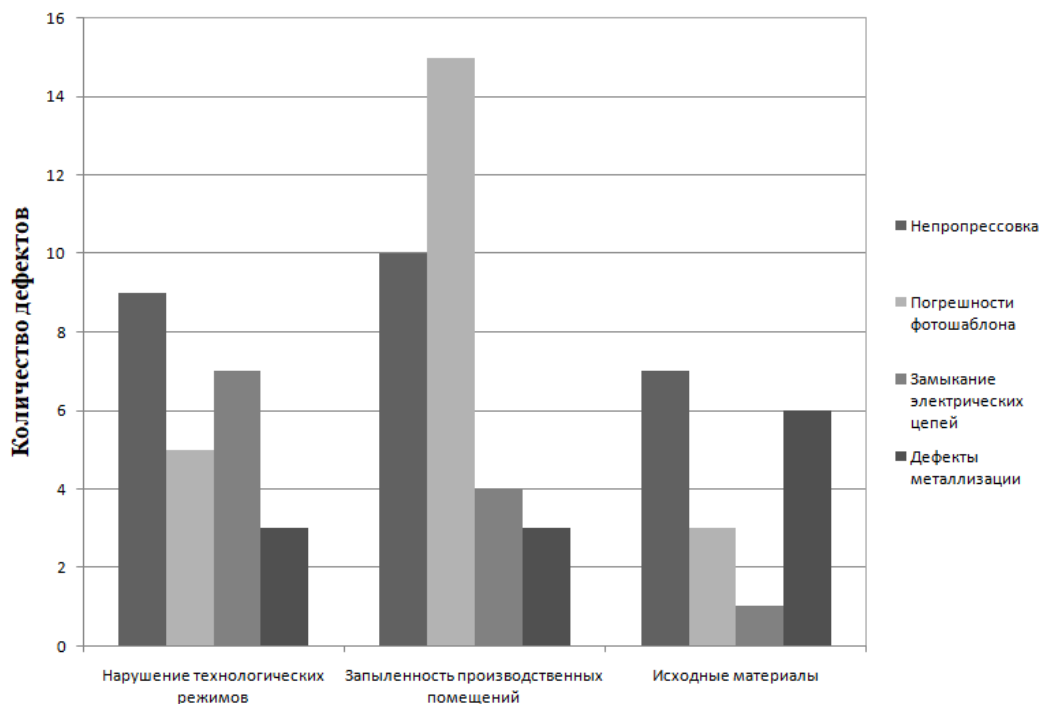


Рис. 5. Распределение дефектов группы А по причинам

Анализ диаграммы на рис. 5 показал, что причиной большинства дефектов является запыленность производственных помещений. Таким образом, можно сделать вывод, что создание чистых производственных помещений и соблюдение вакуумной гигиены на предприятии приведет к значительному снижению дефектов группы А.

Работа предприятия в области повышения качества должна заключаться:

- в создании и поддержании чистых производственных помещений;
- в более тщательном подборе исходных материалов и проведении их входного контроля. Оптимальным будет решение о закупке малых партий материалов, в целях отработки технологических режимов и принятия решений о дальнейшем их использовании;

- в соблюдении технологических режимов на всех стадиях технологического процесса;
- в соблюдении межоперационного хранения изделий.

Методика мониторинга дефектов ПП

На основе проведенного исследования технологических процессов производства ПП и дефектов, возникающих на различных стадиях, а также изучения современных статистических методов анализа дефектов на предприятии должна быть реализована методика мониторинга дефектов ПП, которая включает следующие этапы:

1 этап. Сбор первичной информации для анализа дефектов и формирование статистической базы данных.

Данные о наличии дефектов проводятся на основании маршрутных карт (точный список мероприятий и данных, касающихся перемещений ПП на производстве), куда оператор вносит информацию о возникновении каких-либо дефектов на каждой стадии технологического процесса; на основании бланков ОТК и на основании бланков входного контроля.

2 этап. Первичная обработка данных.

На данном этапе определяется перечень необходимых для использования методов статистического анализа (диаграмма Исикавы, диаграмма Парето и др.) и проводится обработка первичной информации.

3 этап. Выбор путей (мер, мероприятий) снижения количества дефектов ПП.

В ходе анализа устанавливаются те причины, которые приводят к максимальному в общем объеме количеству дефектов. Для этих целей также может использоваться ранее разработанная информационная модель «дефект – причина» (см. табл. 1) [8].

Внедрение данной методики повысит качество выпускаемой продукции за счет значительного снижения выпуска бракованных изделий.

Заключение

Таким образом, были рассмотрены виды дефектов ПП на различных стадиях производства, выявлены причины возникновения дефектов, разработана информационная модель «дефект – причина», проведены исследования и анализ статистических характеристик дефектов ПП, а также предложена методика мониторинга дефектов ПП на предприятии.

Проведенное исследование позволило сформулировать основные направления повышения качества выпускаемой продукции для конкретного производства.

Список литературы

1. Ефимов В. В., Барт Т. В. Статистические методы в управлении качеством продукции. М. : КноРус, 2020. 234 с.
2. Кочегаров И. И., Данилова Е. А., Юрков Н. К. [и др.] Анализ и моделирование развития латентных дефектов печатных проводников // Актуальные проблемы электронного приборостроения : тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. : в 12 т. (г. Новосибирск, 3–6 октября 2016 г.). Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2016. Т. 7. С. 126–131. EDN: YKTTAL
3. Ковалев В. Г., Мешков С. А., Ковалев А. А. Дефекты элементов топологии в производстве печатных плат. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.
4. Kochegarov I. I., Tankov G. V., Danilova E. Dynamic characteristics of printed circuit assembly under the influence of temperature // 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 Inc., 2016. P. 131–134. doi: 10.1109/SCM.2016.7519706 EDN: XFTJTG
5. Григорьев А. В., Данилова Е. А., Држевецкий А. Л. Классификация дефектов бортовой РЭА // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 1. С. 328–331. EDN: RXEXCF
6. Исикава К. Японские методы управления качеством. М. : Экономика, 1988. 215 с.
7. Назаров, М. А., Петухова Н. А. Диаграмма Исикавы анализа причин несоответствия продукции // Дневник науки. 2019. № 1. С. 44. EDN: YWAKAP
8. Данилова Е. А., Кочегаров И. И., Трусов В. А. Модели технологических дефектов проводящего рисунка печатных плат // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2. С. 68–76. doi: 10.21685/2307-4205-2017-2-12 EDN: YPTJLV

9. Шнейдмиллер В. Р. Дефекты и анализ печатных плат // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы Всерос. науч.-техн. конф. (г. Самара, 15–17 мая 2018 г.) / под ред. А. И. Данилина. Самара : Офорт, 2018. С. 176–177. EDN: XPEAQP
10. Юрков Н. К., Кочегаров И. И., Данилова Е. А. Алгоритм моделирования процессов развития латентных технологических дефектов печатных плат // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 (г. Москва, 16–19 июля 2014 г.). М. : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 7092–7097. EDN: SSJDNN
11. Салахов Ф. Н. Диаграмма Парето и ABC-анализ – эффективный инструмент управления качеством продукции // Вестник Курганского государственного университета. Сер.: Технические науки. 2008. № 13. С. 78–81. EDN: NTPZWP
12. Козловский В. Н., Малеев Р. А. ABC анализ в обосновании выбора главных элементов надежности электрооборудования автомобилей // Грузовик. 2009. № 6. С. 31–33. EDN: OKGTTV
13. Данилова Е. А. Построение информационно-измерительной системы обнаружения дефектов проводящего рисунка печатных плат // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 4. С. 76–84. EDN: YGUKKT

References

1. Efimov V.V., Bart T.V. *Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom produktii = Statistical methods in product quality management*. Moscow: KnoRus, 2020:234. (In Russ.)
2. Kochegarov I.I., Danilova E.A., Yurkov N.K. et al. Analysis and modeling of the development of latent defects of printed conductors. *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya: tr. XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.: v 12 t. (g. Novosibirsk, 3–6 oktyabrya 2016 g.) = Actual problems of electronic instrumentation : tr. XIII International scientific and technical conference : in 12 volumes (Novosibirsk, October 3-6, 2016)*. Novosibirsk: Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 2016;7:126–131. (In Russ.). EDN: YKTTAL
3. Kovalev V.G., Meshkov S.A., Kovalev A.A. *Defekty elementov topologii v proizvodstve pechatnykh plat = Defects of topology elements in the production of printed circuit boards*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2007. (In Russ.)
4. Kochegarov I.I., Tankov G.V., Danilova E. Dynamic characteristics of printed circuit assembly under the influence of temperature. *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 Inc., 2016:131–134. doi: 10.1109/SCM.2016.7519706 EDN: XFTJTT
5. Grigor'ev A.V., Danilova E.A., Drzhevetskiy A.L. Classification of on-board REA defects. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013;1:328–331. (In Russ.). EDN: RXEXCF
6. Isikava K. *Yaponskie metody upravleniya kachestvom = Japanese methods of quality management*. Moscow: Ekonomika, 1988:215. (In Russ.)
7. Nazarov, M.A., Petukhova N.A. Ishikawa diagram of the analysis of the causes of nonconformity of products. *Dnevnik nauki = The diary of Science*. 2019;(1):44. (In Russ.). EDN: YWAKAP
8. Danilova E.A., Kochegarov I.I., Trusov V.A. Models of technological defects in the conductive pattern of printed circuit boards. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(2):68–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2017-2-12 EDN: YPTJLV
9. Shneydmiller V.R. Defects and analysis of printed circuit boards. *Aktual'nye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. (g. Samara, 15–17 maya 2018 g.) = Actual problems of radioelectronics and telecommunications : materials of the All-Russian scientific and technical conf. (Samara, May 15–17, 2018)*. Samara: Ofort, 2018:176–177. (In Russ.). EDN: XPEAQP
10. Yurkov N.K., Kochegarov I.I., Danilova E.A. Algorithm for modeling the development of latent technological defects of printed circuit boards. *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014 (g. Moskva, 16–19 iyulya 2014 g.) = XII All-Russian Meeting on management problems of VSPU-2014 (Moscow, July 16–19, 2014)*. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014:7092–7097. (In Russ.). EDN: SSJDNN
11. Salakhov F.N. Pareto diagram and ABC analysis - an effective tool for product quality management. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskies nauki = Bulletin of Kurgan State University. Ser.: Technical Sciences*. 2008;(13):78–81. (In Russ.). EDN: NTPZWP
12. Kozlovskiy V.N., Maleev R.A. ABC analysis in substantiation of the choice of the main elements of reliability of electrical equipment of cars. *Gruzovik = Truck*. 2009;(6):31–33. (In Russ.). EDN: OKGTTV
13. Danilova E.A. Construction of an information and measurement system for detecting defects in the conductive pattern of printed circuit boards. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2016;(4):76–84. (In Russ.). EDN: YGUKKT

Информация об авторах / Information about the authors

Евгения Анатольевна Данилова

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

Надежда Сергеевна Алмашкина

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

Илья Михайлович Рыбаков

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

Evgeniya A. Danilova

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

Nadezda S. Almashkina

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Илья М. Рыбаков

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

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

Поступила в редакцию / Received 22.08.2023

Поступила после рецензирования / Revised 11.09.2023

Принята к публикации / Accepted 30.09.2023

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 681.2.084

doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-12

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ

Н. О. Борщев

Объединенный институт высоких температур, Москва, Россия
moriarty93@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается последовательный алгоритм идентификации теплофизических характеристик, таких как коэффициент теплопроводности материала, массовая теплоемкость и интегрально-излучательная способность поверхности криогенной теплоизоляции для орбитального участка полета. *Материалы и методы.* Все характеристики считаются функциями от температуры и описываются линейно-непрерывными базисными функциями. Исходными данными служит массив замеров температур в зоне установки датчиков температур, геометрические параметры установки, известные начально-граничные условия при проведении экспериментальной тепловой отработки. Первым шагом решается «прямая» задача прогрева материала, после чего составляется среднеквадратичный функционал невязки между теоретическим и экспериментальным полем температур в зоне установки датчиков температур. Далее решается задача минимизации данного функционала методом сопряженных направлений при предварительном выборе шага спуска, исходя из минимума целевого функционала на следующих итерациях, начиная со второй. *Результаты и выводы.* При выполнении критерия останова итерационного процесса считается, что характеристики найдены, иначе данную последовательность необходимо повторить большее число раз.

Ключевые слова: криогенная установка, жидкий азот, итерационная регуляризация, коэффициентная обратная задача, орбитальный полет

Для цитирования: Борщев Н. О. Метод идентификации теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов, предназначенных для термостатирования аппаратуры в условиях невесомости // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 130–141. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-12

METHOD OF IDENTIFICATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THERMAL INSULATION MATERIALS INTENDED FOR TEMPERATURE CONTROL OF EQUIPMENT IN ZERO GRAVITY CONDITIONS

N.O. Borshchev

Joint Institute of High Temperatures, Moscow, Russia
moriarty93@mail.ru

Abstract. *Background.* This paper examines a sequential algorithm for identifying thermophysical characteristics, such as the thermal conductivity coefficient of the material, mass heat capacity and integral emissivity of the cryogenic thermal insulation surface for the orbital flight segment. *Materials and methods.* All characteristics are considered functions of temperature and are described by linear continuous basis functions. The initial data is an array of temperature measurements in the area where temperature sensors are installed, geometric parameters of the installation, and known initial boundary conditions during experimental thermal testing. The first step is to solve the “direct” problem of heating the material, after which the root-mean-square functional of the discrepancy between the theoretical and experimental temperature fields in the area where the temperature sensors are installed is compiled. Next, the problem of minimizing this functional is solved using the conjugate directions method with a preliminary selection of the descent step, based on the minimum of the target functional at the next iterations, starting from the second. *Results and conclusions.* When the criterion for stopping the iterative process is met, it is considered that the characteristics have been found, otherwise this sequence must be repeated a greater number of times.

Keywords: cryogenic installation, a liquid nitrogen, iterative regularization, coefficient inverse problem, orbital flight

For citation: Borshchev N.O. Method of identification of thermophysical characteristics of thermal insulation materials intended for temperature control of equipment in zero gravity conditions. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):130–141. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-12

Введение

При проектировании теплового режима (СОТР) космических аппаратов зачастую применяются пассивные элементы термостатирования различных узлов конструкции. Для этого применяют низко-теплопроводные изоляционные материалы, которые обязаны функционировать в условиях влияния факторов космического пространства. Эти факторы зависят от целевой орбиты функционирования. В орбитальном полете на конструкцию действует солнечный и земные потоки, в зависимости от ориентации космического аппарата и его орбиты, а также потоки, вызванные переизлучением между элементами самой конструкции. Новизна работы состоит в комплексном определении теплофизических свойств низкотемпературной теплоизоляции как функций от температуры на основе экспериментальных данных в виде массива температур.

Установка предназначена для исследования криогенной теплоизоляции в интервале температур 4,2...700 К, давлений $10^{-2} \dots 10^5$ Па, в атмосфере различных газов (воздух, азот, гелий, аргон). Низкие температуры обеспечиваются заправкой модельной емкости хладагентом. На рис. 1 приведена схема установки криостата и некоторые модельные емкости. Испытания проводятся на заправленных криогенной жидкостью маломасштабных модельных баках емкостью до 80 л с комбинированным теплозащитным покрытием.

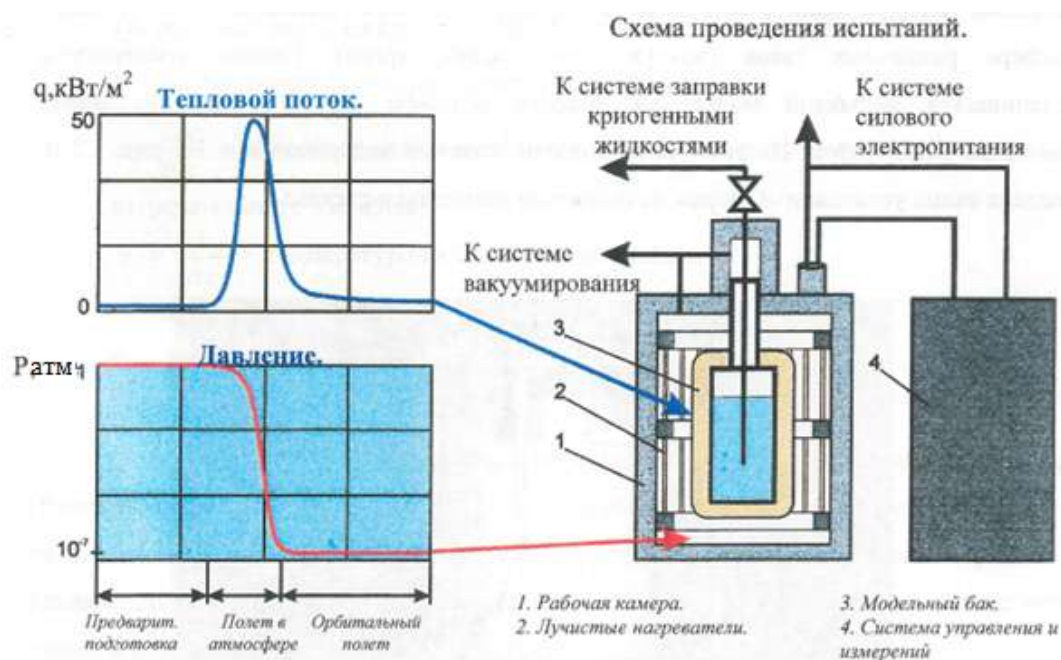


Рис. 1. Схема установки криостата

На поверхности покрытия вдоль высоты устанавливались датчики температур, показания которых выводились на пульт управления режимом испытаний. При проведении испытаний последовательно моделируются по времени основные параметры, определяющие процесс теплообмена в комбинированном теплозащитном покрытии на орбитальном участке его функционирования.

Постановка задачи определения теплофизических характеристик выглядит так: по экспериментальным замерам температур, в местах их установки, составляется среднеквадратичный функционал невязки между теоретическим температурным полем, полученным при решении заданной постановки «прямой» задачи теплообмена и намеренным датчиками. При минимизации данной среднеквадратичной ошибки идет итерационное уточнение исследуемых величин до выполнения критерия остановки итерационного процесса. В качестве этого критерия обычно используют суммарную погрешность измерений.

Постановка «прямой» задачи теплообмена

Запишем уравнение теплопроводности для условий заполнения бака в анизотропной постановке, отражающей картину захлаживания близкую к реальной:

$$C(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} \right].$$

Граничные условия имеют вид

$$\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = \alpha_k(0, y, \tau) (T(0, y, \tau) - T_{\text{ср}});$$

$$\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(l_x, y, \tau)}{\partial x} = A_s(T(l_x, \tau)) q_s + \varepsilon((T(l_x, \tau))) [q_z + q_{\text{переизл}}] + q_{\text{атм}} - \varepsilon((T(l_x, \tau))) \sigma T(l_x, y, \tau)^4;$$

$$\frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial T(x, l_y, \tau)}{\partial y} = 0.$$

В данной постановке задачи введены следующие обозначения: $C_{\text{эф}}(T)$ – объемная теплоемкость материала, $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$; $\lambda_{\text{эф}}(T)$ – теплопроводность материала, $\frac{\text{Вт}}{\text{МК}}$; $Q_{\text{изл}}(x, \tau)$ – удельный тепловой поток, поглощаемый оптическим зеркальным слоем, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; $\varepsilon(T)$ – отражательно-излучательная характеристика материала; $A_s(T)$ – поглощательная способность материала в солнечном спектре; Q_s – солнечный удельный тепловой поток, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; $Q_{\text{атм}}$ – атмосферный удельный тепловой поток, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; σ – постоянная Стефана – Больцмана, $\frac{\text{Вт}}{\text{К}^4 \text{м}^2}$; $Q_{\text{пад}}$ – падающий удельный тепловой поток на облучаемую поверхность, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; $q_{\text{переизл}}$ – падающий переизлученный тепловой поток между элементами конструкции, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Выражение для переизлученного теплового потока имеет вид

$$q_{\text{переизл}}(\tau) = \varphi_{ji} \left[q_j^{\text{ук}}(\tau) + \sigma r_j(T_j(\tau)) \varepsilon_j(T) T_j(\tau)^4 F_j^{\text{rad}} \right].$$

Выражение для результирующего теплового потока имеет вид

$$q_{\text{рез}}(\tau) = A_s(T(l_x, \tau)) q_s + \varepsilon((T(l_x, \tau))) [q_z + q_{\text{переизл}}] + q_{\text{атм}} - \varepsilon((T(l_x, \tau))) \sigma T(l_x, y, \tau)^4;$$

Коэффициент диффузного отражения равен

$$r_j(T_j(\tau)) = 1 - \varepsilon_j(T).$$

Угловой коэффициент диффузного переизлучения между элементами конструкции КА и Имитаторами можно определить из выражения

$$\varphi_{ij} = \frac{\cos\omega_i \cos\omega_j}{\pi l_{ij}^2}.$$

Стоит также отметить, что данная тепловая модель при заполненном криогенном баке преобразится в одномерную постановку задачи из-за постоянного конвективного теплоотока к теплоносителю и будет иметь следующий вид:

$$C(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{эф}(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right];$$

$$\lambda_{эф}(T) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_k((0, \tau))(T(0, \tau) - T_{ср});$$

$$\lambda_{эф}(T) \frac{\partial T(l_x, \tau)}{\partial x} = A_s(T(l_x, \tau))q_s + \varepsilon((T(l_x, \tau)))[q_z + q_{перезл}] + q_{атм} - \varepsilon((T(l_x, \tau)))\sigma T(l_x, y, \tau)^4.$$

Алгоритм идентификации исследуемых теплофизических величин

Искомые исследуемые теплофизические характеристики представим в параметризованном виде, помноженным на соответствующие базисные функции, учитывающие их зависимость от температуры:

$$\lambda_{эф}(T) \approx \sum_{m=1}^M \lambda_p N_m(T); \quad C(T) \approx \sum_{m=1}^M C_p N_m(T); \quad \frac{A_s}{\varepsilon}(T) \approx \sum_{m=1}^M \frac{A_{sp}}{\varepsilon} N_m(T),$$

где $N_m(T)$ – базисные функции, описывающие зависимость искомых теплофизических характеристик от температуры. В данной работе используются линейно-непрерывные базисные функции, имеющие следующий вид:

$$N_m(T) = \begin{cases} 0, T < T_{m-1} \\ \frac{T - T_{m-1}}{T_m - T_{m-1}}, T_{m-1} \leq T \leq T_m, \\ \frac{T_{m+1} - T}{T_{m+1} - T_m}, T_{m-1} \leq T \leq T_m, \\ 0, T > T_m, m = \overline{1, M}. \end{cases}$$

Количество базисных функций целесообразно связать с временными блоками, т.е. в каждом временном блоке своя базисная функция. Рассмотрим восстановление искомых характеристик на основе среднеквадратичного функционала невязки между теоретическим и экспериментальным полем температур:

$$S \left(\lambda_p, C_p, \frac{\varepsilon}{A_{sp}} \right) = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{j=1}^{l_y} \sum_{i=1}^{l_x} \sum_{m=1}^3 \left[T \left(\lambda_p, C_p, \frac{\varepsilon}{A_{sp}} \right) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\tau}) \right]^2 d\tau.$$

В работе используется метод безусловной минимизации функционала $S \left(\lambda_p, C_p, \frac{\varepsilon}{A_{sp}} \right)$ с помощью метода сопряженных градиентов как наиболее точного метода первого порядка точности, позволяющего достичь требуемой сходимости за минимальное число итераций.

Последовательный алгоритм метода сопряженных градиентов можно представить в следующем виде на примере параметризованного коэффициента теплопроводности:

$$\lambda^{n+1} = \lambda^n + \Delta\lambda^{n+1},$$

где

$$\Delta\lambda^{n+1} = -\beta_k p^{(n)}.$$

Направление спуска определяется из:

$$\vec{p}^n = \text{grad}S(\lambda^n) + \beta_n \vec{p}^{n-1};$$

$$\beta_0 = 0, p^{(0)} = \text{grad}S(\lambda^{(0)});$$

$$\beta_n = \frac{|\text{grad}S(\lambda^{(n)})|^2}{|\text{grad}S(\lambda^{(n-1)})|^2}.$$

Критерием останова итерационного процесса является выражение

$$|\text{grad}S(\lambda^{(n)})| = \sqrt{\left\{ \sum_{p=1}^3 \left[\frac{\partial S(\lambda^{(n)})}{\partial \lambda_p} \right]^2 \right\}} \leq \delta_{\text{sum}},$$

где δ_{sum} – погрешность входных данных, вычисленная в той же метрике, что и целевой функционал.

$$\delta_{\text{sum}} = \delta_a + \delta_f + \delta_{\text{окр}},$$

δ_f – погрешность входных температур, определяемая следующими выражением:

$$\delta_f = \int_0^{\tau_{\text{max}}} \sum_{i=1}^M \delta_L(\tau) d\tau.$$

Для определения компонент градиента целевого функционала воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. Для этого запишем обобщенный функционал Лагранжа с ограничениями в виде зашумленного уравнения теплопроводности и его граничных условий вдоль направления x .

П р и м е ч а н и е: граничные условия вдоль направления y не имеют смысла, так как они тождественно равны 0, их участие необходимо только для того, чтобы изменять конвективный теплооток вдоль направления x в зависимости от подъема столба жидкости:

$$\begin{aligned} S = & \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\text{max}}} \sum_{i=1}^{l_x} \sum_{j=1}^{l_y} \sum_{m=1}^3 \left[T \left(\lambda_p, C_p, \frac{\varepsilon}{A_{s,p}} \right) - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\tau}) \right]^2 d\tau + \int_0^{\tau_{\text{max}}} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \Psi(x, y, \tau); \\ [C_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x} \right] dx dy d\tau - \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} \right] dx dy d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_{\text{max}}} \xi(l_x, y, \tau) \left[\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T(l_x, y, \tau)}{\partial x} - A_s q_s + \varepsilon(T) q_i + q_{\text{амм}} - \varepsilon(T) \sigma T(l_x, y, \tau)^4 \right] d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_{\text{max}}} \xi(0, y, \tau) \left[\frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} - \alpha_k(0, y, \tau) (T(0, y, \tau) - T_{cp}) \right] d\tau. \end{aligned}$$

Решив задачу поиска неопределенных множителей Лагранжа и группируя члены, относительно вариаций искоемых параметров, получим компоненты градиента целевого функционала:

$$\frac{\partial S}{\partial \frac{\varepsilon}{A_s}} = -q_s \int_0^{\tau_{\text{max}}} \xi(l_x, y, \tau) \sum_{m=1}^3 N_m(T) d\tau;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial \lambda_p} = & - \int_0^{\tau_{\max}} \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \left(\left[\frac{\partial}{\partial x} \left[N_m(T) \frac{\partial \Delta T(x, y, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial N_m(T)}{\partial T} dT \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x} \right] \right] + \right. \\ & \left. + \left[\frac{\partial}{\partial y} \left[N_m(T) + \frac{\partial N_m(T)}{\partial T} dT \right] \frac{\partial T(x, y, \tau) + \Delta T(x, y, \tau)}{\partial y} \right] \right) dx dy d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_{\max}} \xi(0, y, \tau) \left[\left[\left[N_m(T) + \frac{\partial N_m(T)}{\partial T} dT \right] \frac{\partial T(0, y, \tau) + \Delta T(0, y, \tau)}{\partial x} \right] \right] d\tau. \\ \frac{\partial S}{\partial C_p} = & - \int_0^{\tau_{\max}} \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \psi(x, y, \tau) \left[\sum_{m=1}^M N_m(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} \right] dx dy d\tau. \end{aligned}$$

В качестве регуляризирующего параметра выбирается номер итерации, т.е. на $n + 1$ итерации целевой функционал должен быть минимален:

$$S^{n+1} = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{j=1}^{l_y} \sum_{i=1}^{l_x} \sum_{m=1}^3 \left[T(x, y, \tau) + \Delta T(x, y, \tau) \alpha_s - \tilde{T}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\tau}) \right]^2 d\tau.$$

Для того, чтобы функционал на последующих итерациях был минимален, необходимо выбрать оптимальный шаг спуска в выбранном градиентном методе оптимизации. Для этого продифференцируем наше выражение и приравняем его к нулю и выразим шаг спуска:

$$\alpha_s = \int_0^{\tau_{\max}} \sum_i^{l_x} \sum_j^{l_y} \sum_{m=1}^M \frac{\left[\tilde{T}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\tau}) - T(x, y, \tau) \right]}{\Delta T(x, y, \tau)} d\tau,$$

где ΔT – вариация температурного поля, удовлетворяющего постановке задачи в вариациях температур.

Таким образом, можно сформулировать принцип работы данного алгоритма идентификации теплофизических параметров. Суть его заключается в следующем:

1. Проводиться захлаживание криогенной емкости, в результате чего система измерения считывает показания температур в местах их установки.
2. Решается «прямая» задача прогрева теплозащиты при реализации граничных условий, характерных для этапа орбитального полета.
3. Далее после результатов испытаний теплоизоляционных материалов составляется средне-регуляризуемая интегральная ошибка между теоретическим и экспериментальным полем температур в зонах установки датчиков температур.
4. Решается задача оптимизации данного функционала при предварительном вычислении компонент градиентов параметризованных целевых функций.
5. Ищется шаг спуска в методе «сопряженных» направлений, обеспечивающий минимум целевого функционала на следующей итерации или регуляризирующий параметр в методе регуляризации А. Н. Тихонова.
6. Получаем значения целевых функций на следующей итерации. При выполнении условия останова полученные значения каждого из блоков домножаются на свои характерные базисные функции, считается, что зависимости получены, иначе процесс 1–5 выполняется повторно.

Результаты решения обратной коэффициентной задачи для орбитального участка полета

Для верификации данного расчетного алгоритма проанализируем испытания, описанные в работе [3]. Объектом захлаживания являлся маломасштабный бак, представленный на рис. 1, с местами установки датчиков температур.

Обечайка бака была изготовлена с вафельным подкреплением с плоскими днищами из сплава АМг6 (рис. 1). Снаружи бак был покрыт теплоизоляцией толщиной 50 мм. В нижнюю часть бака по гибкому шлангу подавался жидкий азот из криогенного резервуара. На верхнем днище был выполнен дренажный штуцер, к которому был подсоединен трубопровод с вентилем, с помощью которого регулировалось давление внутри бака.

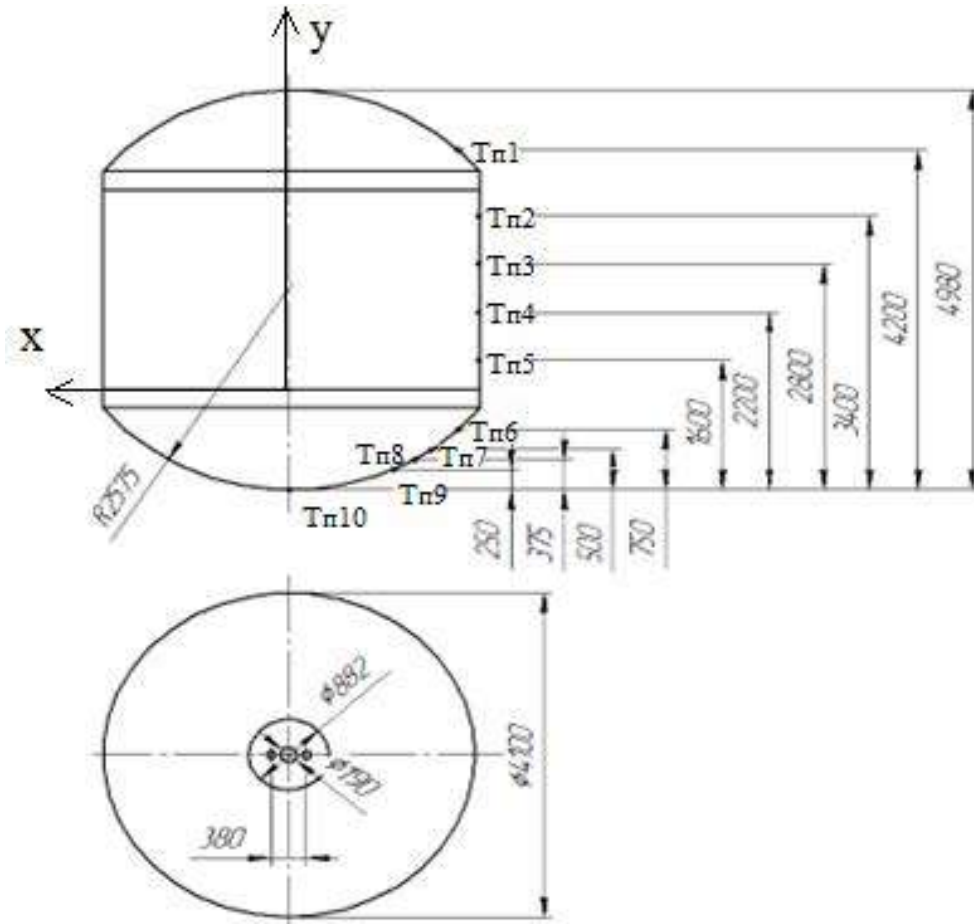


Рис. 2. Схема расположения термодпар на баке (Тп)

Исходные данные обратной коэффициентной задачи по определению исследуемых характеристик на орбитальном участке полета в виде падающей удельной тепловой нагрузки и замеров температур в местах их установки представлены на рис. 3, 4.

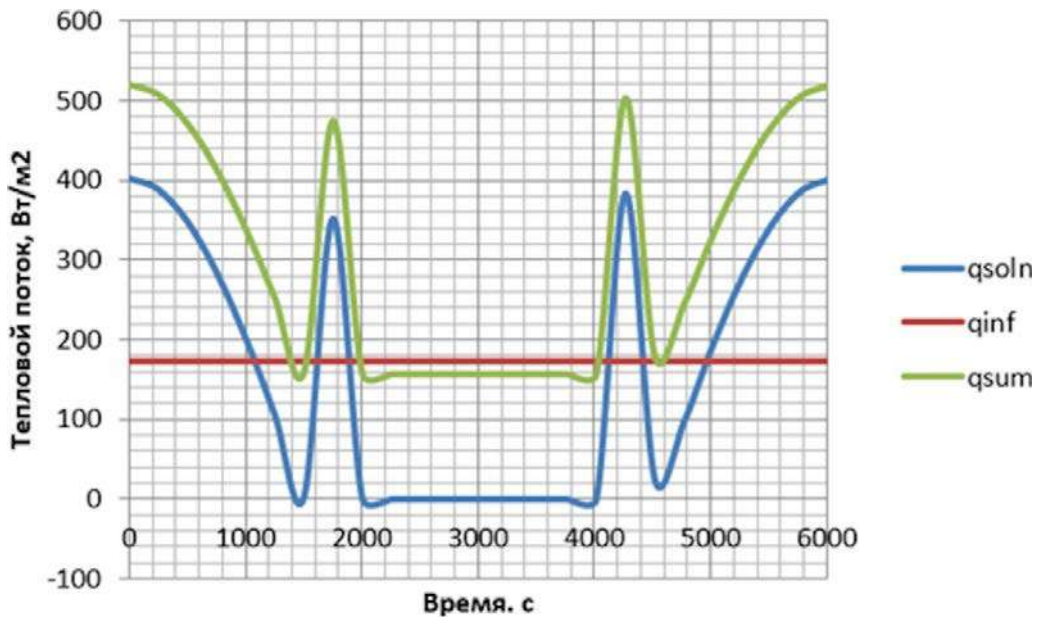


Рис. 3. Результаты расчета падающей тепловой нагрузки на теплоизоляционный материал, которые должны воспроизводиться при экспериментальной тепловой отработке

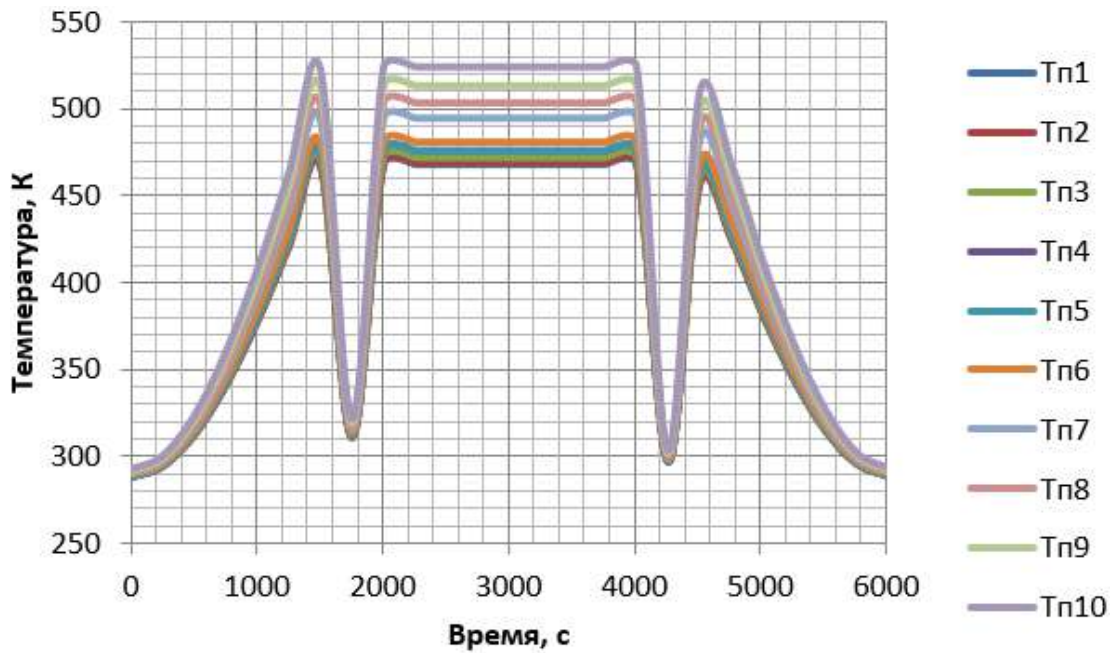


Рис. 4. Результаты замеров экспериментальных температур в местах установки датчиков температур

В данной работе в силу симметрии теплового потока относительно 3000 с целесообразно рассмотреть три временных блока, где параметризованные значения теплофизических параметров постоянны. Таким образом решено, что первый временной блок рассматривает временной диапазон с 0 до 1500 с, с 1500 до 2000 с и с 2000 до 3000 с. Итерационные изменения ошибки расчета тепловых потоков в первом временном блоке и значений исследуемых характеристик показаны на рис. 5, 6. Характерные значения на рис. 5 – параметризованные значения исследуемых характеристик с соответствующими размерностями. Для удобства нанесения графиков на одну числовую ось было решено возвести объемную теплоемкость в степень 10^{-5} .

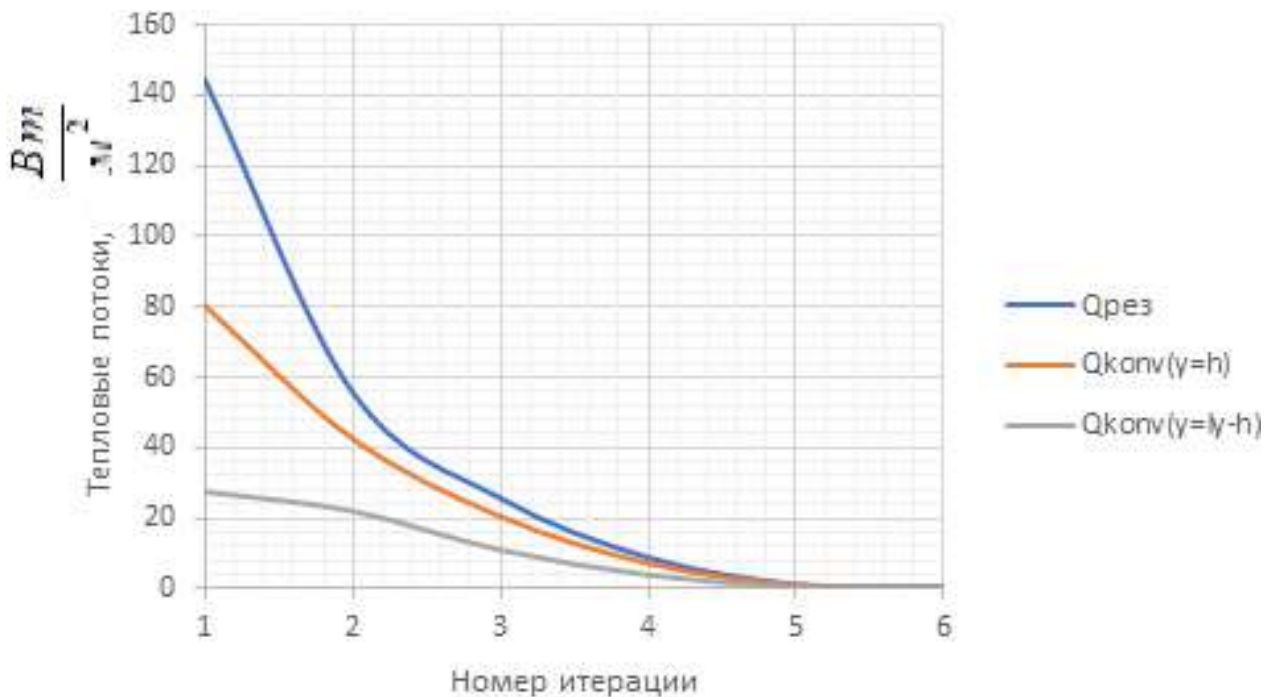


Рис. 5. Итерационные изменения ошибки расчета тепловых потоков от номера итерации для первого временного блока (для результирующего потока, конвективного потока в зависимости от высоты подъема столба жидкости в ходе заправки)

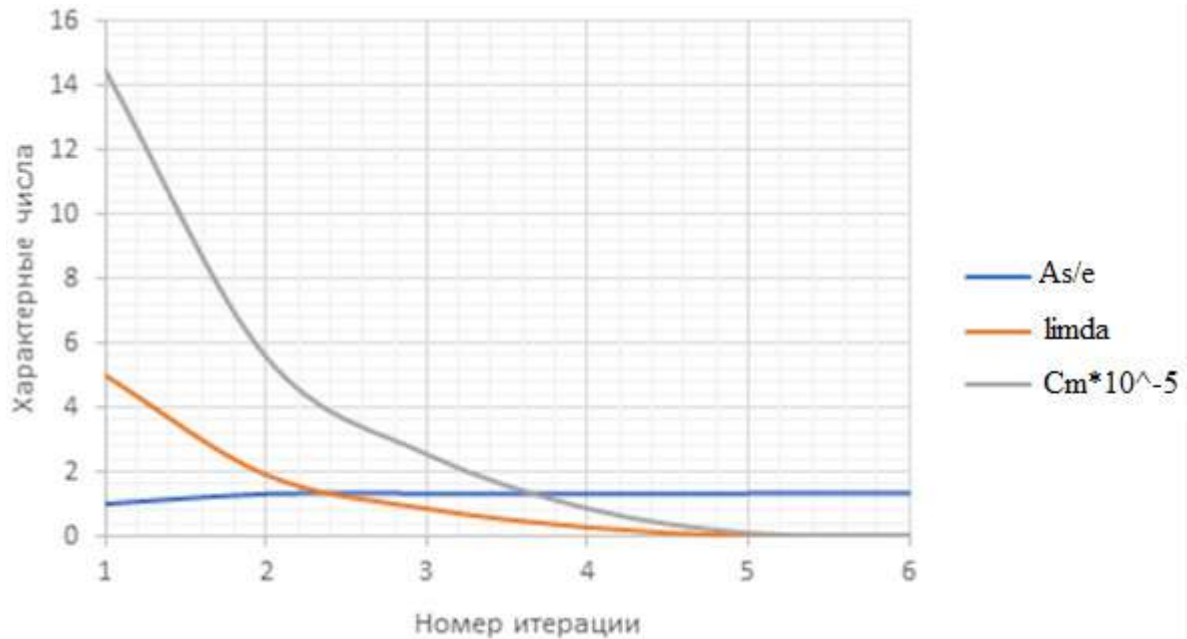


Рис. 6. Итерационные изменения параметрических величин исследуемых характеристик от номера итерации для первого временного блока (A_s/e , λ , C_m)

Как видно из анализа рис. 5 и 6, достаточно 6 итераций для выхода на стационарные значения исследуемых теплофизических величин, которые воссоздадут экспериментальное температурное поле с доверительным бюджетом ошибок.

Сходимость итерационного процесса лучше всего демонстрируется на нерегуляризуемой невязке, где наглядно видно, что она выходит на некоторый стационарный режим, что говорит о совпадении теоретического и температурного поля с разницей в среднеквадратичной погрешности. Результаты представлены на рис. 7.

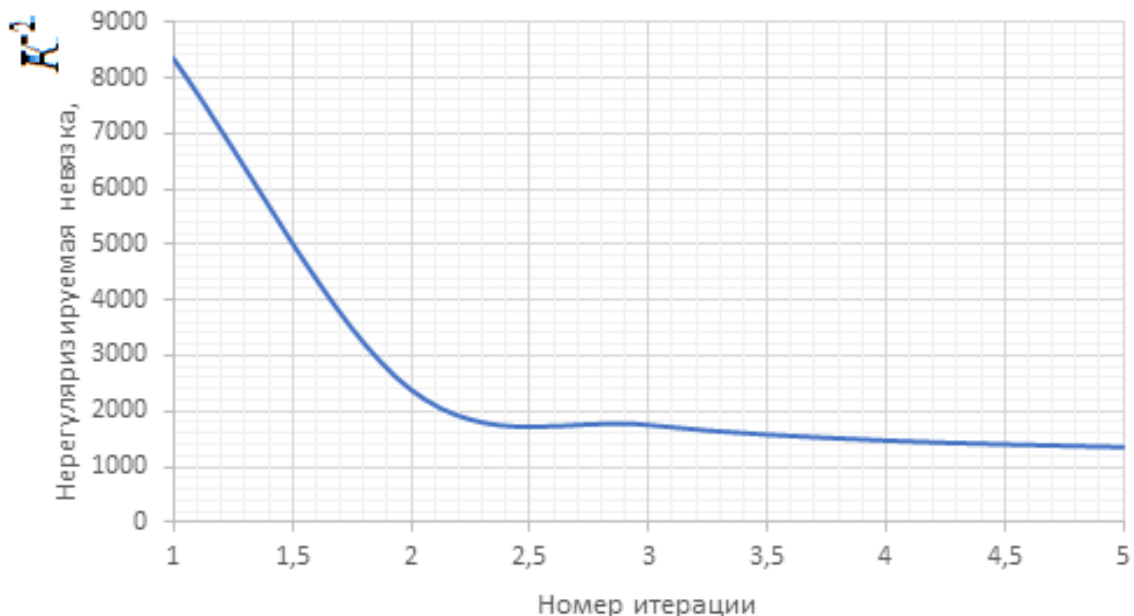


Рис. 7. Результаты расчета нерегуляризуемой невязки (среднеквадратичной ошибки) между теоретическим и экспериментальным температурным полем в местах установки датчиков температур для первого временного блока

Значения полученных теплофизических характеристик как функций от температуры показаны на рис. 8.

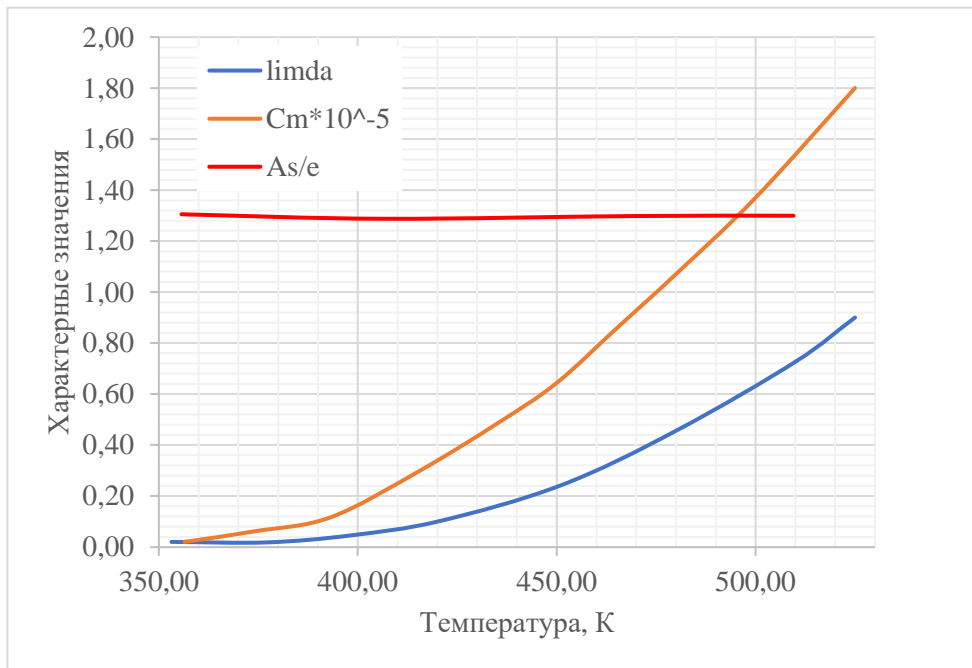


Рис. 8. Результаты расчета исследуемых теплофизических параметров как функций от температуры (A_s/e , λ , Cm)

Таким образом, для получения экспериментального температурного поля необходимо выбирать проектные теплофизические параметры из рис. 8 в каждый момент времени.

Исследуемая теплоизоляция имела справочную теплопроводность, равную 0,035 Вт/мК при переменной температуре, а в данной работе этот параметр искался совместно с теплоемкостью и A_s/e . Графическая зависимость относительной погрешности определения коэффициента теплопроводности от температуры приведена на рис. 9.

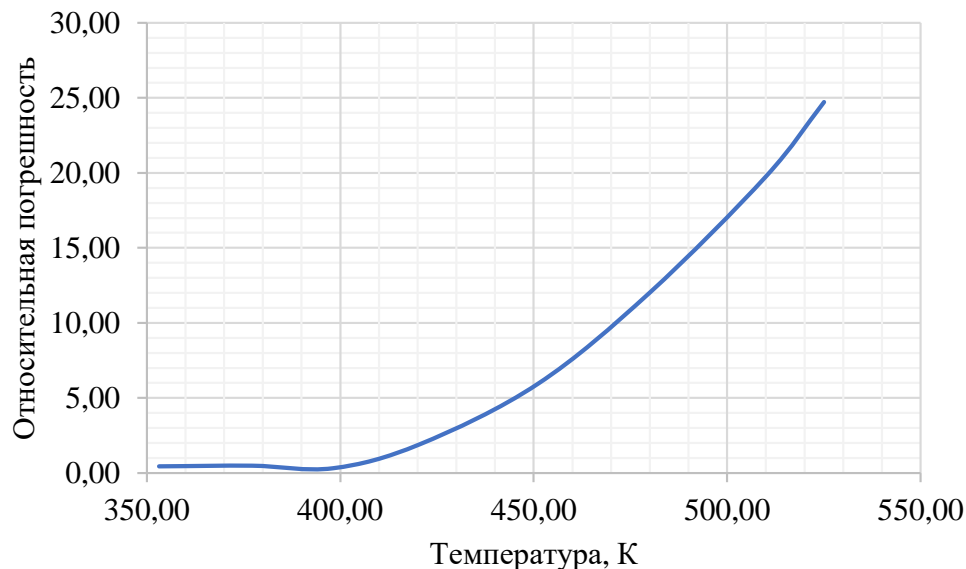


Рис. 9. Результаты расчета относительной погрешности как функции от температуры

Таким образом, полученные результаты показали, что при уровне температур от 370 до 550 К коэффициент теплопроводности будет варьироваться в пределах 0,02–0,8 Вт/мК, значения массовой теплоемкости будут лежать в диапазоне 2000–200 000 Дж/К, соотношение $\frac{A_s}{\varepsilon}$ в районе 1,4. Анализ относительной погрешности, представленный на рис. 9, показывает, что в данной работе удалось

оценить лишь порядок величин искомых характеристик теплоизоляционного материала. Это объясняется неполнотой исходной информации о зависимости этих характеристик от температуры.

Заключение

1. Разработан метод параметрической идентификации набора теплофизических характеристик как функций от температуры методом итерационной регуляризации в приближении двунаправленного прогрева для орбитального участка полета.

2. Продемонстрированы результаты данного алгоритма на примере определения коэффициента теплопроводности, массовой теплоемкости и теплопроводности как функций от температуры.

3. Результаты показали, что на уровне температур от 370 до 550 К коэффициент теплопроводности будет варьироваться в пределах 0,02–0,8 Вт/мК, значения массовой теплоемкости будут лежать в диапазоне 2000–200 000 Дж/К, соотношение $\frac{A_s}{\varepsilon}$ в районе 1,4.

Список литературы

1. Алифанов О. М. Обратные задачи теплообмена. М. : Машиностроение, 1988. 280 с.
2. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Румянцев С. В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1988. 288 с.
3. Борщев Н. О., Юранев О. А. Теоретическая оценка времени захлаживания бака жидкого водорода при испытаниях на прочность // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 12. С. 83–89.
4. Бугрова А. Д., Котляров Е. Ю., Финченко В. С. Методика предварительного анализа теплового режима приборной панели посадочного лунного модуля. Часть 2. Оценка температуры посадочных мест и пути модификации СТР // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2021. № 3. С. 23–29.
5. Воронов В. А., Карякина Е. Д., Ахмеров Э. В. Анализ технических решений в области транспорта и хранения сжиженного природного газа // Вестник международной академии холода. Холодильная техника. 2019. № 3. С. 15–22.
6. Галеев А. Г., Орлов В. А. Численное моделирование процесса заправки стендового бака жидким водородом // Полет. 2019. № 12. С. 54–62.
7. Карслоу У., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М. : Наука, 1964. 487 с.
8. Кологов А. В., Усов Г. Л. Методика анализа процессов захлаживания системы питания жидкостного ракетного двигателя и заправки топливного бака // Вестник НПО Техномаш. 2018. № 4. С. 62–64.
9. Пелевин Ф. В., Пономарев А. В., Лоханов И. В. Экспериментальное исследование теплообмена при двумерном межсеточном движении теплоносителя в охлаждающем тракте камеры ЖРД двигательных установок перспективных КА // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2020. № 3. С. 61–64.
10. Борщев Н. О. Параметрическая идентификация падающего теплового потока как функция от времени и координаты методом итерационной регуляризации // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 15–23.
11. Борщев Н. О. Параметрическая идентификация теплопроводности высокопористых материалов в условиях воздействия факторов космического пространства // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 98–109.

References

1. Alifanov O.M. *Obratnye zadachi teploobmena = Inverse problems of heat transfer*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:280. (In Russ.)
2. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rummyantsev S.V. *Ekstremal'nye metody resheniya nekorrektnykh zadach = Extreme methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Nauka, 1988:288. (In Russ.)
3. Borshchev N.O., Yuranev O.A. A theoretical assessment of the cooling time of a liquid hydrogen tank during strength tests. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2021;(12):83–89. (In Russ.)
4. Bugrova A.D., Kotlyarov E.Yu., Finchenko V.S. Method of preliminary analysis of the thermal regime of the instrument panel of the lunar landing module. Part 2. Assessment of the temperature of the seats and the ways of modification of the page. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina = Bulletin of the S. A. Lavochkin NGO*. 2021;(3): 23–29. (In Russ.)
5. Voronov V.A., Karyakina E.D., Akhmerov E.V. Analysis of technical solutions in the field of transportation and storage of liquefied natural gas. *Vestnik mezhdunarodnoy akademii kholoda. Kholodil'naya tekhnika = Bulletin of the International Academy of cold. refrigeration equipment*. 2019;(3):15–22. (In Russ.)

6. Galeev A.G., Orlov V.A. Numerical modeling of the process of filling a bench tank with liquid hydrogen. *Polet = Flight*. 2019;(12):54–62. (In Russ.)
7. Karslou U., Eger D. *Teploprovodnost' tverdykh tel = Thermal conductivity of solids*. Moscow: Nauka, 1964:487. (In Russ.)
8. Kologov A.V., Usov G.L. Methodology for analyzing the processes of cooling the power supply system of a liquid rocket engine and refueling the fuel tank. *Vestnik NPO Tekhnomash = Bulletin of NPO Technomash*. 2018;(4):62–64. (In Russ.)
9. Pelevin F.V., Ponomarev A.V., Lokhanov I.V. Experimental study of heat transfer during two-dimensional interstitial motion of a coolant in the cooling path of the LRE chamber of propulsion systems of promising spacecraft. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina = Vestnik NPO named after S. A. Lavochkin*. 2020;(3):61–64. (In Russ.)
10. Borshchev N.O. Parametric identification of incident heat flow as a function of time and coordinates by iterative regularization method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):15–23. (In Russ.)
11. Borshchev N.O. Parametric identification of thermal conductivity of highly porous materials under the influence of space factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):98–109. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Олегович Борщев

кандидат технических наук, ведущий инженер,
Объединенный институт высоких температур
(Россия, г. Москва, ул. Ижорская, 13)
E-mail: moriarty93@mail.ru

Nikita O. Borshchev

Candidate of technical sciences, leading engineer,
Joint Institute of High Temperatures
(13 Izhorskaya street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 05.07.2023

Поступила после рецензирования/Revised 10.08.2023

Принята к публикации/Accepted 01.09.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАТНЫХ ОТКАЗОВ В АППАРАТУРЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А. В. Заяра¹, В. П. Фандеев²

¹ Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹zaw1966@mail.ru, ²fandeevVP@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* 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. *Материалы и методы.* Рассматривается диагностическая модель, описывающая состояние аппаратуры при возникновении в ней кратных отказов. *Результаты и выводы.* Разработка диагностического обеспечения на основе этой модели позволит успешно выполнить основные задачи технического диагностирования.

Ключевые слова: техническое диагностирование, электроаппаратура, робототехнические комплексы, поиск места отказа, диагностическая модель, кратные отказы

Для цитирования: Заяра А. В., Фандеев В. П. Моделирование кратных отказов в аппаратуре мобильных робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 142–151. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-13

SIMULATION OF MULTIPLE FAILURES IN THE EQUIPMENT OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES

A.V. Zayara¹, V.P. Fandeev²

¹ Military Innovative Technopolis "ERA", Anapa, Russia

² Penza State University, Penza, Russia

¹zaw1966@mail.ru, ²fandeevVP@mail.ru

Abstract. *Background.* Robotic complexes are equipped with complex electrical equipment of various operating principles, which is subject to inevitable failures. Successful search for failure sites, including multiple ones, will determine the effectiveness of the maintenance and repair system. *Materials and methods.* A diagnostic model is considered that describes the state of the equipment when multiple failures occur in it. *Results and conclusions.* The development of diagnostic software based on this model will allow you to successfully complete the main tasks of technical diagnostics.

Keywords: technical diagnostics, electrical equipment, robotic systems, failure location search, diagnostic model, multiple failures

For citation: Zayara A.V., Fandeev V.P. Simulation of multiple failures in the equipment of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):142–151. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-13

Мобильные робототехнические комплексы (РТК) повсеместно внедряются во все области человеческой деятельности. Для реализации требований к автономности и адаптивности аппаратура комплексов постоянно усложняется. Одновременно с этой тенденцией обоснованно возникает проблема совершенствования системы технической эксплуатации комплексов, под которой понимается комплекс мероприятий, направленных на поддержание РТК в готовности к использованию по назначению. Важнейшей ее составляющей является подсистема технического обслуживания и ремонта (ТО и Р)¹.

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

Особое место в определении уровня эффективности мероприятий подсистемы занимает пригодность аппаратуры комплексов к проведению технического диагностирования (ТД). Это – процесс определения технического состояния объекта¹, который проводится с применением штатных контрольно-измерительных приборов, диагностического оборудования и контрольно-проверочной аппаратуры. Основными задачами ТД являются контроль технического состояния и поиск места отказа. Для выполнения требований стандартов при проектировании РТК должно разрабатываться диагностическое обеспечение на основе анализа диагностической модели аппаратуры, которая является исходными данными для выбора диагностических параметров и методов их оценки, составления алгоритмов ТД [1].

Общими требованиями к моделям, описывающим отказы в аппаратуре, являются адекватность, универсальность и удобность. В соответствии с этими требованиями модель должна охватывать как можно большее число частных случаев и быть применимой в различных ситуациях². Для выполнения упомянутых требований предлагается рассмотреть применение диагностической модели в форме ориентированного графа причинно-следственных (информационно-энергетических) связей между типовыми элементами замены (ТЭЗ), позволяющих обеспечить методическую достоверность при поиске кратных отказов.

Требования государственных стандартов при разработке диагностического обеспечения проектируемого изделия обязывают использовать в качестве отправной точки его диагностическую модель, которая строится на основе предполагаемой конструкции, условий использования и эксплуатации объекта. В результате исследования диагностической модели устанавливают диагностические признаки, прямые и косвенные параметры, а также методы их оценки, определяют условия работоспособности, разрабатывают алгоритмы диагностирования. Совокупность этих данных называют диагностическим обеспечением. Как правило, используются аналитические модели: дифференциальные уравнения, логические соотношения, диаграммы прохождения сигналов или передаточные функции, предполагающие применение методов индивидуального контроля [2]. При таком методическом подходе к обеспечению контролепригодности состав диагностических параметров получается избыточным, что влечет за собой дополнительные затраты на средства ТД и увеличивает его продолжительность.

Предлагается диагностическая модель, которая задается представлением совокупности физических свойств объекта и его топологии в виде ориентированного графа с указанием причинно-следственных связей, описывающих взаимоотношения между его элементами и параметрами и предполагающая применение методов совместного контроля [2], что позволит оптимизировать состав диагностических параметров, не снижая методическую достоверность контроля.

Первым этапом построения диагностической модели является ее представление в неявном виде в форме ориентированного графа, который формируется на основе структурно-аналитического метода [2]. Исходными данными служат руководство по эксплуатации: прежде всего, функциональная схема объекта диагностирования (ОД) и перечень параметров, используемых при контроле объекта. Такая модель является универсальной для аналоговых и цифровых объектов при условии применения «допусковых» методов контроля параметров, в том числе методов исчерпывающего тестирования (счет переходов и единиц, сигнатурный анализ), и подходит для решения задач диагностирования.

Неявная диагностическая модель (*implicit diagnostic model*) представляется ориентированным графом

$$D_{idm} = (V, F), \quad (1)$$

где V – множество вершин, каждая из которых соответствует конкретному контролируемому параметру; F – множество дуг, показывающих аналитические или статистические зависимости и качественные соотношения между параметрами.

Размерность модели (1) определяется мощностью множеств видов состояния и параметров. Каждый параметр $v_i \in V$ ($i = 1 \dots n$, $n = |P|$) сопоставлен определенному типовому элементу замены, с глубиной до которого производится поиск места отказа. Дугам в ориентированном графе соответствуют качественные соотношения между параметрами. Орграф также представляется в виде матрицы смежности размером $n \times n$, в которой каждая строка сопоставлена вершине v_i , а столбец – дуге f_i . Пример орграфа (1), поясняющий диагностическую модель объекта в неявном виде, приведен на рис. 1.

¹ ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.

² ГОСТ Р 27.004-2009. Надежность в технике. Модели отказов.

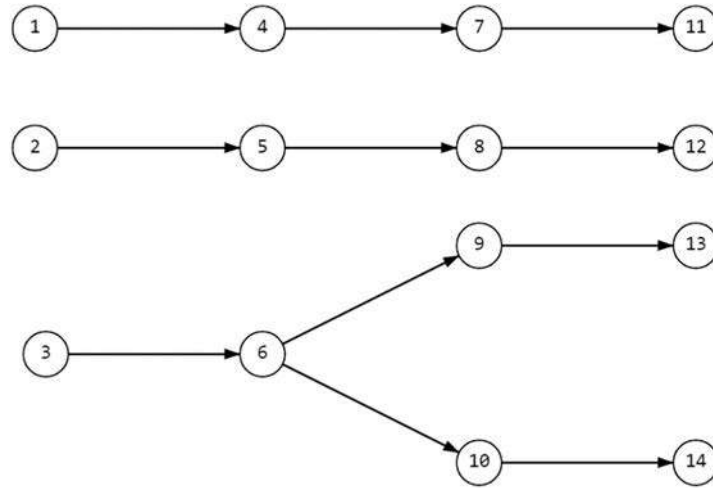


Рис. 1. Пример ориентированного графа диагностической модели в неявном виде

Как правило, граф-модель всего ОД – составной оргграф, состоящий из нескольких связанных подграфов. Для решения первой задачи ТД достаточно оценить (проверить) множество конечных параметров V_k , непосредственно характеризующих его техническое состояние. Так как электроаппаратура РТК относится к многорежимным объектам, то эти параметры проверяются в режимах контроля [6], воспроизводящих штатные режимы работы аппаратуры. Как правило, этим параметрам в оргграфе (1) соответствуют вершины с нулевой полустепенью исхода $d^+(v_i) = 0$. Обычно это – конечные вершины подграфов (*terminal vertex*) (подмножество $V_{iv} \subset V$). Для рассматриваемого примера (рис. 1) $V_{iv} = \{v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}\}$. По значениям контролируемых параметров судят об изменении технического состояния.

Представление ориентированного графа (1) в форме матрицы смежности позволяет выполнить дальнейшие преобразования для получения диагностической модели в явном виде – совокупности формальных описаний неисправных состояний ОД [2].

1. Транзитивное замыкание оргграфа (*transitive closure*) преобразует матрицу смежности оргграфа (1) в матрицу смежности транзитивно замкнутого графа $|D| \rightarrow |D_{ic}^*|$. Замкнутый оргграф D_{ic}^* наглядно демонстрирует влияние каждой предыдущей вершины на последующие по направлению ориентирования графа. Также процедура замыкания позволяет выявить дополнительные контуры обратной связи в ОД.

2. Исправное состояние каждого ТЭЗ будет проявляться допустимыми значениями диагностических параметров, т.е. каждая вершина в замкнутом графе будет иметь петлю. В матрице достижимости всем диагональным элементам необходимо присвоить значение $v_{ii} = 1$.

3. Завершающий этап – инвертирование всех элементов матрицы.

В результате этих преобразований получается матрица, которая содержит информацию о состояниях объекта при возможных недопустимых значениях контролируемых параметров. На основе этой матрицы можно построить оргграф, поясняющий бинарное отношение между множеством видов состояний (отказов) и множеством альтернативных результатов контроля параметров

$$\varphi = E \times U, \tag{2}$$

где E – множество вершин, сопоставленных видам состояния вероятных, однократных отказов (строки матрицы); U – множество вершин, сопоставленных допустимым и недопустимым значениям параметров (столбцы матрицы), которые, в свою очередь,

$$U = U^1 \cup U^0, U^1 \cap U^0 = \emptyset, \tag{3}$$

U^1 – подмножество результатов проверок, показавших допустимые значения диагностических параметров, $U^1 \in U$; U^0 – подмножество результатов проверок, показавших недопустимые значения диагностических параметров, $U^0 \in U$.

Бинарное отношение φ представляет собой диагностическую модель в явном виде (*explicit diagnostic model*), которая может быть визуализирована двудольным оргграфом Φ_{exp} . Матрица отношения φ и двудольный оргграф Φ_{exp} представлены на рис. 2. Необходимо обратить внимание, что в

первоначальном виде полученная матрица не может быть интерпретирована как двудольный ориентированный граф. Существующие средства визуализации позволяют автоматизировать построение двудольного графа, но применительно к этому случаю необходимо последовательно произвести с матрицей φ дополнительные преобразования для получения наглядного рисунка. Тем не менее матрица отношения φ может служить исходными данными для локализации области отказа и оптимизации алгоритмов его поиска, но это – отдельные аспекты решения второй задачи ТД.

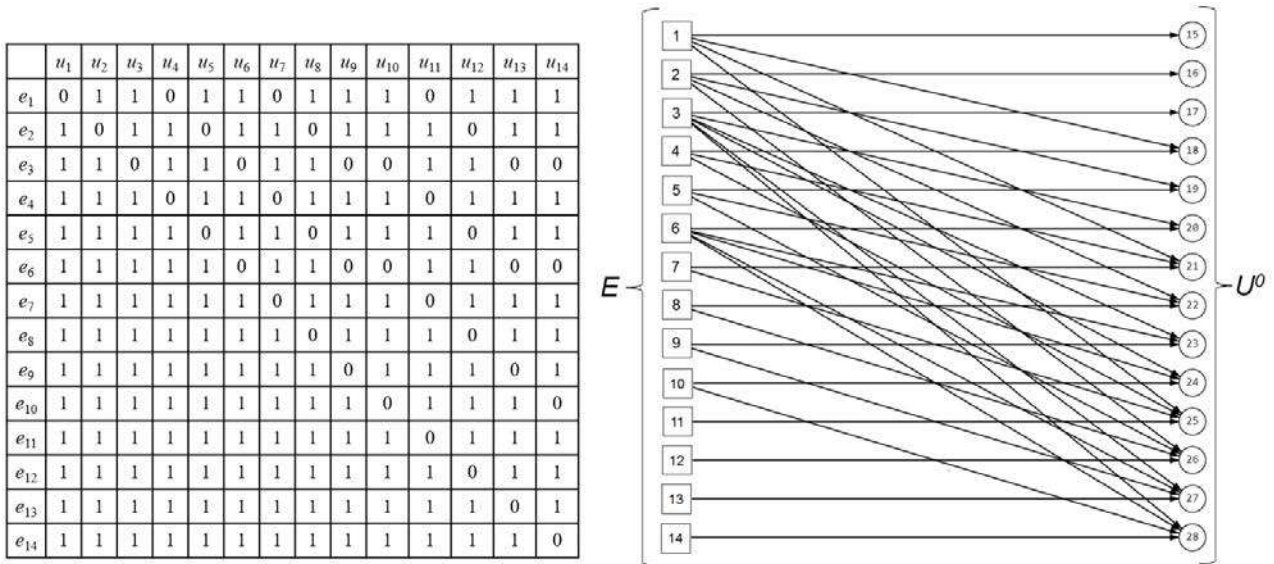


Рис. 2. Матрица и двудольный орграф, поясняющие сущность диагностической модели в явном виде

Бинарное отношение (2) может записываться как

$$\varphi: E \rightarrow U, \tag{4}$$

и показывает, что отказы элементов определяют значения контролируемых параметров.

В матрице отношения (4) каждая i -я строка показывает влияние отказа элемента объекта, непосредственным следствием которого является недопустимое значение i -го параметра (значение «0» на главной диагонали), на исходы (результаты) проверок остальных диагностических параметров в этом объекте. Каждая i -я строка может классифицироваться как кортеж [4] и является описанием неисправного состояния однократного отказа типового элемента замены.

Вершина e_i (отказ элемента объекта, следствием которого является недопустимое значение i -го параметра) соединяется дугами с вершинами, принадлежащими множеству U_j , которое, в свою очередь, представлено объединением двух подмножеств по аналогии с формулой (3), но теперь уже для конкретного состояния однократного отказа e_i

$$U_j^0 \cup U_j^1 = U_j, \text{ где } U_j \subset U, \tag{5}$$

где U_j^0 – подмножество результатов проверок j -х параметров, находящихся вне допустимых пределов, которым соответствуют «0» в i -й строке матрицы $|\varphi|$; U_j^1 – подмножество допустимых исходов проверок j -х параметров и имеющих «1» в i -й строке матрицы $|\varphi|$. Пример матрицы диагностической модели в явном виде для состояния однократного отказа e_1 и подграфа $\varphi(e_1)$ поясняется схемой на рис. 3.

Каждый однократный отказ e_i следствием из формулы (4) имеет свой образ $\varphi(e_i)$, который представлен строкой в матрице графа отношения φ или i -м кортежем длины n , составленным из элементов множества U – различной комбинацией исходов проверок согласно (5)

$$\varphi(e_i) = U_j^{0 \vee 1}, \text{ где } U_j^{0 \vee 1} = \{u_1^{0 \vee 1}, u_2^{0 \vee 1}, \dots, u_n^{0 \vee 1}\}. \tag{6}$$

Элемент $u_j^{0 \vee 1}$ называется j -й компонентой кортежа. Каждый кортеж в матрице однократного отказа имеет разное описание (исходы проверок)

$$\varphi(e_i) \neq \varphi(e_k), i \neq k, i, k = 1 \dots n. \tag{7}$$

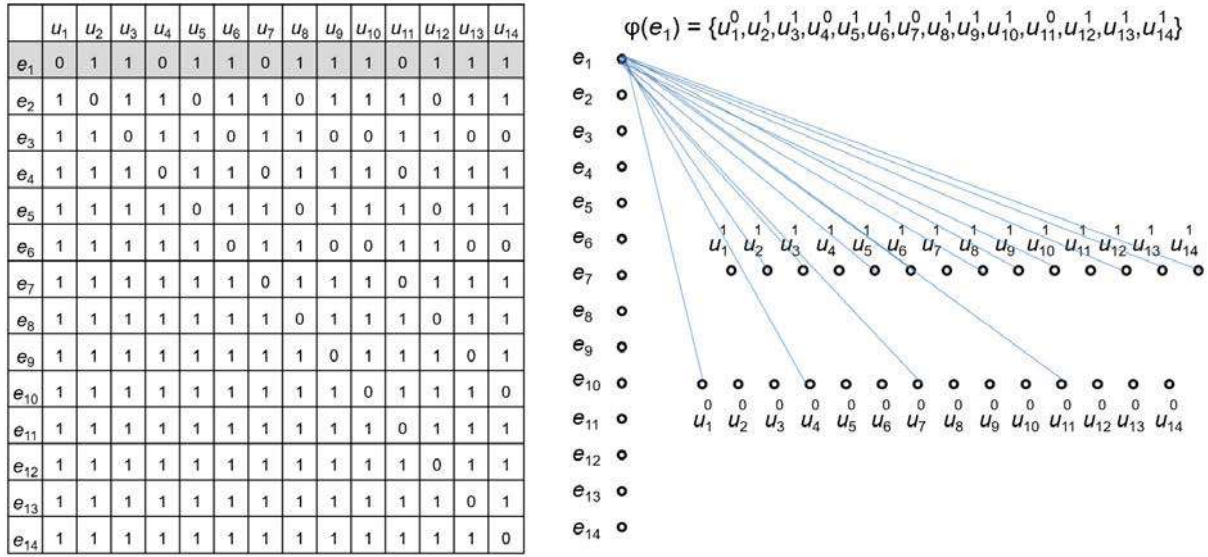


Рис. 3. Схема, поясняющая матрицу и оргграф модели однократного отказа e_1

Другими словами, отказ любого элемента не может проявляться одновременно недопустимым и допустимым значением параметра, т.е. в матрице графа φ нет одинаковых строк [2].

Анализируя матрицу модели в явном виде по столбцам, можно сделать выводы, что граф Φ_{exp} обладает следующими свойствами:

$$\varphi^{-1}(u_j^0) \cup \varphi^{-1}(u_j^1) = E; \tag{8}$$

$$\varphi^{-1}(u_j^0) \cap \varphi^{-1}(u_j^1) = \emptyset, j = 1 \dots n, \tag{9}$$

где $\varphi^{-1}(u_j^0)$ и $\varphi^{-1}(u_j^1)$ – прообразы соответствующих вершин ($u_j^{0 \vee 1}$). Зависимость (8) свидетельствует о том, что исходы проверок в каждом столбце представляют собой вертикальный кортеж и проявляются различными значениями диагностических параметров (n – число параметров). Также условия (8) и (9) свидетельствуют, что диагностических параметров достаточно для распознавания всех состояний однократных отказов [2].

По различным причинам в аппаратуре РТК могут возникнуть одновременно несколько отказов различных типовых элементов замены. Универсальность модели в форме матрицы отношения φ заключается, как раз, в том, что она позволяет получить описание состояния ОД при наличии в нем кратных отказов.

Прежде чем приступить к формированию модели кратного отказа в объекте, следует проанализировать последовательность формирования кортежей (6) на основе причинно-следственных связей орграфа (1).

Формализованное описание однократного отказа в матрице – строка с исходами проверок $\varphi(e_i)$. Значение «0» на j -м порядковом месте в строке показывает, что в матрице транзитивно замкнутого графа есть дуга из i -й вершины графа (1) в j -ю, которая и определяет недопустимый результат проверки j -го диагностического параметра. И наоборот, значение «1» свидетельствует об отсутствии влияния i -й вершины на исход проверки какого-либо диагностического параметра объекта.

Предлагается к рассмотрению модель двукратного отказа. Количество строк во вновь сформированной матрице увеличится до значения

$$S = \frac{(n+1)!}{2(n-1)!} \vee S = \frac{n(n+1)}{2}, \tag{10}$$

которое рассчитывается как биномиальный коэффициент или сумма членов арифметической прогрессии. Каждая строка в этой матрице будет сопоставлена по состоянию одновременного отказа двух элементов e_i и e_j , представляет собой кортеж, полученный конъюнкцией двух кортежей

$$\varphi(e_i \wedge e_j) = \varphi(e_i) \circ \varphi(e_j), i \neq j. \tag{11}$$

Для определения появления во вновь формируемой матрице неразличимых состояний проводится анализ связности на основе орграфа диагностической модели (1). Исходными данными служит матрица смежности транзитивно замкнутого орграфа

$$D_{tc} = (V, F_{tc}), \tag{12}$$

где F_{tc} – множество дуг транзитивно замкнутого орграфа, которые удовлетворяют условию

$$\exists \forall (f_k, f_l) \wedge (f_l, f_m) \Rightarrow \exists (f_k, f_m), \tag{13}$$

если существует ориентированный путь (дуга) из вершины v_k в v_l и затем из v_l в v_m , то добавляется дуга из v_k в v_m . Тогда при существовании отказа e_k в матрице явной диагностической модели исходом проверки u_k будет «0». Это и есть один из «0», принадлежащих главной диагонали матрицы. Согласно (6) каждый однократный отказ e_i имеет свой образ – кортеж. А значит, в этом кортеже (строке матрице), соответствующем e_i , исходы «0» будут соответствовать тем диагностическим параметрам (вершинам), на которые распространяет свое влияние вершина v_k , т.е. в эти вершины есть транзитивные дуги из нее. Другими словами, возвращаясь к графу D_{tc}^* , который описывает отношение связности (транзитивного влияния), получается, что образ вершины $f_{tc}^*(v_k)$ будет включать в себя вершины, в которые приходят из вершины v_k дуги.

Предлагается рассмотреть в качестве примера независимый подграф модели (1), в частности, его транзитивно замкнутую версию с корневой вершиной $\delta^-(v_3) = 0$ (рис. 4). Образ корневой вершины будет включать в себя все остальные вершины $f_{tc}^*(v_3) = \{v_6, v_9, v_{10}, v_{13}, v_{14}\}$.

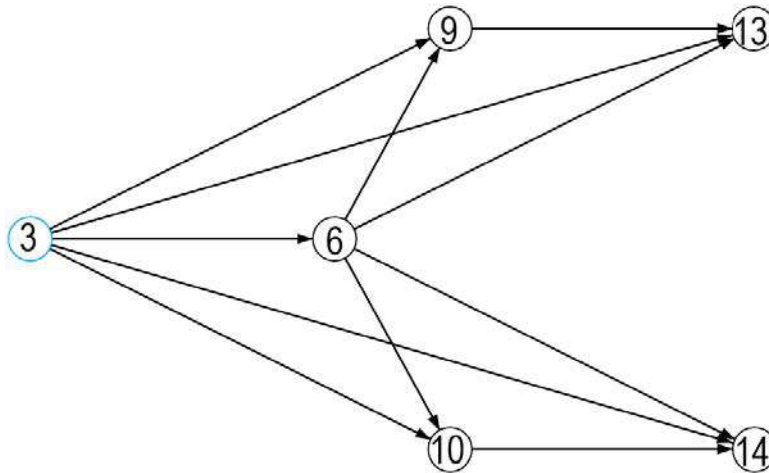


Рис. 4. Связное поддерево транзитивно замкнутого орграфа D_{3tc}

При формировании матрицы двукратного отказа внутри каждой такой области будут формироваться неразличимые кортежи, т.е. условие (7) для множества двукратных отказов уже не будет работать. Предлагается рассмотреть это новое свойство на примере одного отдельного подграфа D_{3tc} (рис. 4) для вершины $\delta^-(f_3) = 0$.

В матрице, соответствующей модели двукратного отказа (табл. 1), появятся одинаковые строки, соответствующие множествам сочетаний однократных отказов диагностических параметров, входящих в рассматриваемый подграф:

$$\varphi(e_3) = \varphi(e_3 \wedge e_6) = \varphi(e_3 \wedge e_9) = \varphi(e_3 \wedge e_{10}) = \varphi(e_3 \wedge e_{13}) = \varphi(e_3 \wedge e_{14}); \tag{14}$$

$$\varphi(e_6) = \varphi(e_6 \wedge e_9) = \varphi(e_6 \wedge e_{10}) = \varphi(e_6 \wedge e_{13}) = \varphi(e_6 \wedge e_{14}); \tag{15}$$

$$\varphi(e_9) = \varphi(e_9 \wedge e_{13}) \text{ и } \varphi(e_{10}) = \varphi(e_{10} \wedge e_{14}). \tag{16}$$

По мере удаления от корневой вершины степень влияния последующих снижается и количество одинаковых кортежей уменьшается, что наглядно демонстрируется транзитивно замкнутым орграфом на рис. 4.

Таблица 1

Матрица двукратных отказов неразличимыми строками

Отказы	Исходы проверок					
	u_3	u_6	u_9	u_{10}	u_{13}	u_{14}
e_3	0	0	0	0	0	0
e_6	1	0	0	0	0	0
e_9	1	1	0	1	0	1
e_{10}	1	1	1	0	1	0
e_{13}	1	1	1	1	0	1
e_{14}	1	1	1	1	1	0
$e_3 \wedge e_6$	0	0	0	0	0	0
$e_3 \wedge e_9$	0	0	0	0	0	0
$e_3 \wedge e_{10}$	0	0	0	0	0	0
$e_3 \wedge e_{13}$	0	0	0	0	0	0
$e_3 \wedge e_{14}$	0	0	0	0	0	0
$e_6 \wedge e_9$	1	0	0	0	0	0
$e_6 \wedge e_{10}$	1	0	0	0	0	0
$e_6 \wedge e_{13}$	1	0	0	0	0	0
$e_6 \wedge e_{14}$	1	0	0	0	0	0
$e_9 \wedge e_{10}$	1	1	0	0	0	0
$e_9 \wedge e_{13}$	1	1	0	1	0	1
$e_9 \wedge e_{14}$	1	1	0	1	0	0
$e_{10} \wedge e_{13}$	1	1	1	0	0	0
$e_{10} \wedge e_{14}$	1	1	1	0	1	0
$e_{13} \wedge e_{14}$	1	1	1	1	0	0

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при наличии в объекте двукратных отказов свойство (7) нельзя применить для различения состояний (поиска отказавшего типового элемента замены). По этой причине в состав матрицы явной диагностической модели двукратных отказов, построенной на основе ориентированного графа причинно-следственных связей, обязательно будут включены одинаковые строки.

В матрице двукратного отказа появляются четыре группы неразличимых строк в соответствии с формулами (14)–(16). В табл. 1 для наглядности они выделены одинаковыми оттенками серого цвета. После того, как из каждой группы неразличимых строк оставить только по одной уникальной строке, матрица двукратного отказа приобретет вид табл. 2.

Несмотря на то, что условия (8) и (9) в рассматриваемом случае не работают, организация поиска места отказа с использованием рассматриваемой модели обеспечивает требуемую достоверность. Место ТД в технологических операциях ТО и Р поясняется схемой на рис. 5¹.

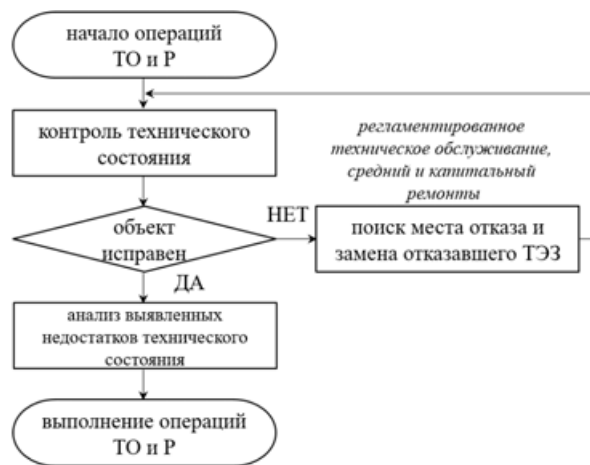


Рис. 5. Обобщенная схема, поясняющая место ТД в технологических операциях ТО и Р комплекса

¹ ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.

В модели матрицы двукратного отказа (табл. 2) остались только неразличимые состояния, соответствующие сочетаниям определенных отказов, которым в транзитивно замкнутом графе D_{tc}^* сопоставлены пары вершин, не имеющих отношение связности [5, 6]:

$$e_9 \wedge e_{10}; e_9 \wedge e_{14}; e_{10} \wedge e_{13} \text{ и } e_{13} \wedge e_{14}. \tag{17}$$

Все другие неразличимые сочетания состояний будут однозначно содержать в себе отказ элемента, инициирующего отношение связности. Применяя алгоритмы поиска места отказа, разработанные на основе модели однократного отказа, распознается группа сочетаний, которую объединил отказ инициирующего элемента. Также вполне очевидно, что, используя процедуру диагностирования с восстановлением (рис. 5), алгоритмы поиска приведут к нахождению одного отказавшего элемента из пар (17). Для подтверждения теоретических заключений предлагается провести статистическое моделирование, сущность которого поясняется схемой на рис. 6. В модели двукратного отказа (табл. 2) имитируется поиск отказавшего состояния, которое проявляется определенным размещением исходов проверок: нулей и единиц.

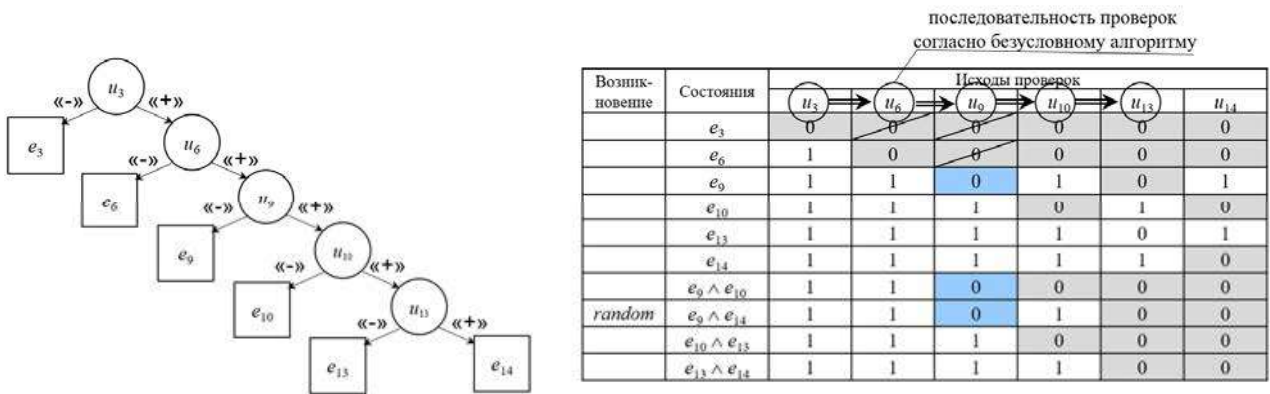


Рис. 6. Схема, поясняющая процедуру поиска места отказа с использованием безусловного алгоритма в области D_{3tc}

Таблица 2

Матрица различных состояний двукратных отказов

Состояния	Исходы проверок					
	u_3	u_6	u_9	u_{10}	u_{13}	u_{14}
e_3	0	0	0	0	0	0
e_6	1	0	0	0	0	0
e_9	1	1	0	1	0	1
e_{10}	1	1	1	0	1	0
e_{13}	1	1	1	1	0	1
e_{14}	1	1	1	1	1	0
$e_9 \wedge e_{10}$	1	1	0	0	0	0
$e_9 \wedge e_{14}$	1	1	0	1	0	0
$e_{10} \wedge e_{13}$	1	1	1	0	0	0
$e_{13} \wedge e_{14}$	1	1	1	1	0	0

На схеме в левой части рисунка представлен граф безусловного алгоритма поиска места отказа. Окружностями на дихотомическом графе обозначены проверки элементов, входящих в состав подграфа D_{3tc} . Из каждой окружности выходят по две дуги. Одна обозначена знаком «-» и соответствует отрицательному исходу проверки, вторая – «+» и свидетельствует, что значение диагностического параметра находится в пределах допуска.

Моделирование проводится следующим образом. В псевдослучайном порядке выбирается одно из состояний отказов, перечисленных в втором столбце матрицы. Затем с помощью определенной алгоритмом последовательности оцениваются исходы проверок в зависимости от моделируемого состояния объекта. В рассматриваемом примере псевдослучайным образом назначено состояние одновременных отказов $e_9 \wedge e_{14}$. В дереве алгоритма первой проверкой назначена проверка u_3 . В этом

состоянии ее исход определяется в допустимых пределах «+». Следовательно, назначается вторая проверка в установленной последовательности u_6 , а состояние e_3 вычеркивается из дальнейшего поиска (не рассматривается). Далее, согласно алгоритму, следует проверка u_9 . В соответствии с матрицей состоянию $e_9 \wedge e_{14}$ сопоставлен недопустимый исход u_9^0 . Такой же недопустимый исход определяют состояния e_9 и $e_9 \wedge e_{10}$ (выделены синим цветом на схеме). Все три состояния: e_9 , $e_9 \wedge e_{10}$ и $e_9 \wedge e_{14}$ проверка u_9 выделяет своим отрицательным исходом. Истинное состояние объекта диагностирования $e_9 \wedge e_{10} \subset \{e_9, e_9 \wedge e_{10}, e_9 \wedge e_{14}\}$ включено в подмножество состояний, которое выделяет u_9^0 . Другими словами, однозначно можно сделать вывод, что поиск с использованием данной модели позволяет различить одно состояние из сочетания отказов. А замена обнаруженного отказавшего ТЭЗ по принципу, поясняемому схемой на рис. 5, гарантирует нахождение второго отказавшего элемента.

Для подтверждения теоретических заключений разработана программа на языке C++, реализующая статистическое моделирование. Проведено 1000 машинных реализаций на основе модели (см. табл. 2) и безусловного алгоритма поиска места отказа (рис. 6). Во всех случаях состояние отказа было определено.

Рассмотренная в статье модель позволяет формализовать разработку диагностического обеспечения к сложной аппаратуре, входящей в состав РТК. Помимо этого, еще на этапе разработки модель создает исходные данные для выполнения требований национального стандарта (ГОСТ 15.016-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению) к номенклатуре диагностических (контролируемых) параметров, средствам методам и правилам ТД [7, 8].

Диагностическая модель кратного отказа служит исходными данными для формирования требований к составу встроенных средств контроля в конструкции изделия и автоматизации процедуры поиска отказавшего ТЭЗ. В результате снижается трудоемкость ручного поиска и, соответственно, улучшается эффективность подсистемы ТО и Р.

Список литературы

1. Бородин С. М. Основы технической диагностики электронных средств : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2019. С. 48.
2. Фандеев В. П., Волков В. С. Методические основы диагностического моделирования электронных приборов и аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. Спецвыпуск № 1. С. 47–53.
3. Еремин Е. Л., Пикуль З. Д., Теличенко Д. А. Алгоритмы систем адаптации для одного класса структурно и параметрически неопределенных объектов с запаздыванием по управлению // Вестник ТОГУ. 2015. № 2.
4. Кривцова И. Е., Лебедев И. С., Настека А. В. Основы дискретной математики. Часть 1 : учеб. пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2016. С. 92.
5. Бородин С. М. Основы технической диагностики электронных средств : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2019. С. 48.
6. Алексеев В. Е., Захарова Д. В. Теория графов : учеб. пособие. Нижегородский госуниверситет, 2017. С. 119.
7. 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.
8. Бецов А. В. О возможной модели утраты работоспособности системы аэромобильных комплексов специального назначения // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 1. С. 3–8.

References

1. Borodin S.M. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki elektronnykh sredstv: ucheb. posobie = Fundamentals of technical diagnostics of electronic means : textbook*. Ul'yanovsk: UIGTU, 2019:48. (In Russ.)
2. Fandeev V.P., Volkov V.S. Methodological foundations of diagnostic modeling of electronic devices and equipment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences*. 2017;(Spec.ed.1):47–53. (In Russ.)
3. Eremin E.L., Pikul' Z.D., Telichenko D.A. Algorithms of adaptation systems for one class of structurally and parametrically indeterminate objects with control delay. *Vestnik TOGU = Bulletin of the TOGU*. 2015;(2). (In Russ.)
4. Krivtsova I.E., Lebedev I.S., Nasteka A.V. *Osnovy diskretnoy matematiki. Chast' 1: ucheb. posobie = Fundamentals of discrete mathematics. Part 1 : textbook*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2016:92. (In Russ.)
5. Borodin S.M. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki elektronnykh sredstv: ucheb. posobie = Fundamentals of technical diagnostics of electronic means : textbook*. Ul'yanovsk: UIGTU, 2019:48. (In Russ.)

6. Alekseev V.E, Zakharova D.V. *Teoriya grafov: ucheb. posobie = Graph theory : textbook*. Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2017:119. (In Russ.)
7. 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.)
8. Betskov A.V. On a possible model of loss of operability of a system of special-purpose airmobile complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(1):3–8. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Заяра

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
научно исследовательского отдела,
Военный инновационный технополис «ЭРА»
(Россия, г. Анапа, Пионерский пр-кт, 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, профессор
кафедры медицинской кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: fandeevVP@mail.ru

Vladimir P. Fandeev

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

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

Поступила в редакцию / Received 18.08.2023

Поступила после рецензирования / Revised 25.08.2023

Принята к публикации / Accepted 09.09.2023

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

М. И. Корнилова¹, С. В. Бусыгин², В. Н. Ковальногов³, В. Н. Клячкин⁴

^{1, 2, 3, 4} Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия
¹ masha.kornilova.1995@mail.ru, ² sergey18.06.95@mail.ru, ³ kvn@ulstu.ru, ⁴ v_kl@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Качество функционирования сложных технических систем определяется множеством характеристик. Прогнозирование значений этих характеристик по результатам мониторинга показателей работы объекта дает возможность выполнять 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. *Материалы и методы.* Для построения моделей по результатам наблюдений за исследуемым объектом используются как классические методы регрессионного анализа, так и методы машинного обучения. В работе проводится сравнение двух подходов: применения линейного регрессионного анализа и композиционного метода «случайный лес (Random Forest)». *Результаты и выводы.* Разработана технология математического моделирования и прогнозирования характеристик качества функционирования технических объектов с использованием двух подходов: линейной регрессии и метода случайного леса. В рассматриваемом примере оценки качества горелочного устройства по температуре ядра пламени оба подхода дали практически одинаковый и вполне приемлемый результат. Очевидно, что в других задачах эти результаты могут существенно различаться.

Ключевые слова: показатели функционирования, регрессионный анализ, машинное обучение, случайный лес, система Statistica

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации, проект НШ-28.2022.4.

Для цитирования: Корнилова М. И., Бусыгин С. В., Ковальногов В. Н., Клячкин В. Н. Прогнозирование качества функционирования технического объекта с использованием машинного обучения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 152–158. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-14

FORECASTING THE QUALITY OF THE TECHNICAL OBJECT'S FUNCTIONING USING MACHINE LEARNING

M.I. Kornilova¹, S.V. Busygin², V.N. Kovalnogov³, V.N. Klyachkin⁴

^{1, 2, 3, 4} Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
¹ masha.kornilova.1995@mail.ru, ² sergey18.06.95@mail.ru, ³ kvn@ulstu.ru, ⁴ v_kl@mail.ru

Abstract. *Background.* The quality of functioning of complex technical systems is determined by many characteristics. Forecasting the values of these characteristics based on the results of monitoring the performance of the facility makes it possible to fulfill the ever-growing requirements for safety and reliability. The necessary accuracy of forecasting requires the construction of high-quality mathematical models. As a technical object, the burner device is considered: the quality of operation of such devices is evaluated according to one of the main characteristics – the temperature of the flame core. The purpose of the study is to develop a methodology for building a mathematical model that would provide a fairly accurate forecast of the characteristics of the functioning of a technical object. *Materials and methods.* To build models based on the results of observations of the object under study, both classical methods of regression analysis and machine learning methods are used. The paper compares two approaches: the use of linear regression analysis and the compositional method "Random Forest". *Results and conclusions.* The technology of mathematical modeling and forecasting of the characteristics of the quality of functioning of technical objects using two approaches

has been developed: linear regression and the random forest method. In the example under consideration, the evaluation of the quality of the burner device from the temperature of the flame core, both approaches gave almost the same and quite acceptable result. Obviously, in other tasks, these results can vary significantly.

Keywords: performance indicators, regression analysis, machine learning, random forest, Statistica system

Financing: the study was supported by a grant from the President of the Russian Federation, project NSH-28.2022.4.

For citation: Kornilova M.I., Busygin S.V., Kovalnogov V.N., Klyachkin V.N. Forecasting the quality of the technical object's functioning using machine learning. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(4):152–158. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-14

Постановка задачи

Качество функционирования сложных технических систем определяется множеством характеристик. Прогнозирование значений этих характеристик по результатам мониторинга показателей работы объекта дает возможность выполнять постоянно растущие требования по обеспечению безопасности и надежности [1–3].

Необходимая точность прогнозирования требует построения качественных математических моделей. Для построения таких моделей по результатам наблюдений за исследуемым объектом используются как классические методы регрессионного анализа, так и методы машинного обучения [4, 5]. Исходные данные могут быть получены различными способами: по результатам эксплуатации объекта, по данным специально поставленных испытаний, по информации, полученной с помощью математического моделирования работы рассматриваемого объекта.

В настоящей работе проводится сравнение двух подходов: применения линейного регрессионного анализа и композиционного метода «случайный лес (Random Forest)». Для численного исследования используются два модуля локализованной версии 13.3 системы Statistica: «Множественная регрессия» и «Случайные леса» [6].

В качестве технического объекта рассмотрено горелочное устройство: оценивается качество функционирования таких устройств по одной из основных характеристик – температуре ядра пламени (в терминологии регрессионного анализа – отклик). Величина этой температуры зависит от нагрузки, расхода воздуха, метана и биогаза, составов топлива и окислителя, и других – всего 17 показателей (регрессоров) [7].

Из методов машинного обучения был выбран метод «случайный лес» как один из наиболее эффективных в задачах классификации и регрессии [8, 9]. Известно, что лучшие результаты в подобных исследованиях дает глубокое обучение нейронных сетей, однако для применения этого подхода необходим достаточно большой объем выборочных данных (сотни тысяч, а лучше миллионы наблюдений [10]), что для технических систем, как правило, нереально: для построения моделей обычно используется несколько десятков или сотен наблюдений.

Выборка исходных данных разбивается на две части: обучающую и тестовую. Обучающая часть предназначена для построения математических моделей: необходимо построить алгоритм, который для заданного набора показателей функционирования обеспечил бы достаточно точный результат о характеристике качества работы объекта. При этом, как и в любых задачах машинного обучения, возможно переобучение.

Тестовая часть выборки предназначена для оценки качества полученной модели: на тестовом наборе показателей функционирования проводится сравнение опытных и прогнозируемых данных, полученных по построенной модели. О качестве модели и отсутствии переобучения можно судить по различным критериям. В данном исследовании использована средняя абсолютная процентная ошибка (Mean Absolute Percentage Error)

$$\text{MAPE} = \frac{1}{l_T} \sum_{i=1}^{l_T} \frac{|\tilde{y}_i - y_i|}{y_i} 100\% ,$$

где y_i – опытное значение отклика в i -м наблюдении; \tilde{y}_i – прогнозируемое значение отклика по рассматриваемой модели; l_T – объем тестовой выборки.

Цель исследования – разработка методики построения математической модели с наименьшим значением ошибки MAPE, которая бы обеспечила достаточно точный прогноз характеристик функционирования технического объекта.

Линейная регрессионная модель

Модель множественной линейной регрессии имеет вид [4, 5]

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon,$$

где Y – отклик (случайная величина); x_j ($j = 1 \dots p$) – факторы, оказывающие влияние на отклик (регрессоры); p – количество регрессоров (в рассматриваемом примере $p = 17$); ϵ – ошибки наблюдений; β_j (здесь $j = 0 \dots p$) – параметры модели, которые необходимо оценить.

Часть файла исходных данных-прецедентов, используемых для оценки параметров, показана на рис. 1.

X1	X2	X3		X12	X13	X14	X15	X16	X17	Y
195	22344	2000		0,2315	0,7685	0	0	483	1,14	2030
247	25798,5	2437,5		0,2315	0,7685	0	0	487	1,08	2055
254	26870,375	2562,5		0,2315	0,7685	0	0	491	1,07	2060
299	31064,775	2962,5		0,2315	0,7685	0	0	495	1,07	2078
310	32609,5	3025		0,2315	0,7685	0	0	499	1,1	2095
355	36877,4	3550	...	0,2315	0,7685	0	0	503	1,06	2105
401	48272,35	4037,5		0,2315	0,7685	0	0	507	1,22	2120
420	45141,25	4187,5		0,2315	0,7685	0	0	511	1,1	2145
425	49017,15	4275		0,2315	0,7685	0	0	515	1,17	2147
430	50715	4312,5		0,2315	0,7685	0	0	519	1,2	2150
400	40358,85	4037,5		0,1956	0,7559	0,0156	0,0329	477	1,02	1891
400	40358,85	4037,5		0,1788	0,7500	0,0229	0,0483	477	1,02	1803

Рис. 1. Часть файла исходных данных-прецедентов

Вектор оценок $\tilde{\beta}$ параметров модели по методу наименьших квадратов определяется по формуле

$$\tilde{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y, \tag{3}$$

где Y – вектор наблюдений, содержащий l_0 значений откликов (в рассматриваемом опыте $l = 300$ наблюдений; выборка разбивалась на обучающую и тестовую части в пропорции 80/20, поэтому объем обучающей части выборки $l_0 = 240$); X – регрессионная матрица, содержащая элементы x_{ij} (регрессоры) – результаты i -го наблюдения ($i = 1 \dots l$) за j -й переменной.

Для проверки значимости модели используется критерий Фишера. Если модель оказалась значимой, далее проверяется значимость каждого регрессора по критерию Стьюдента. При незначимости соответствующий регрессор удаляется из модели, и расчет проводится заново. Последовательное удаление незначимых регрессоров из модели представляет алгоритм пошаговой регрессии.

В практических ситуациях иногда возникают проблемы с обращением регрессионной матрицы $(X^T X)^{-1}$. Это связано с мультиколлинеарностью регрессоров, когда между ними существует корреляционная связь, близкая к линейной: есть коэффициенты корреляции, близкие к единице.

В рассматриваемой выборке исследовалось наличие корреляционных связей между показателями. Сильная корреляция (выборочный коэффициент корреляции $r > 0,9$) имеет место между парами показателей X_4 - X_5 , X_4 - X_9 , X_5 - X_9 , X_6 - X_7 , X_6 - X_{11} .

Для случая мультиколлинеарности регрессоров разработаны варианты регуляризации регрессионной модели. Один из них – использование гребневой регрессии (или ридж-регрессии), когда к диагональным элементам матрицы добавляется некоторое малое число:

$$\tilde{\beta} = (X^T X + E)^{-1} X^T Y,$$

E – единичная матрица. Параметр λ обычно меньше 0,1 и может быть подобран по некоторому критерию.

Для характеристики качества модели может быть использован коэффициент детерминации – квадрат коэффициента корреляции между опытными y_i и прогнозируемыми \tilde{y}_i значениями (показывает, какая доля дисперсии отклика может быть объяснена рассматриваемыми регрессорами):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^l \tilde{y}_i^2 - l_0 \bar{y}^2}{\sum_{i=1}^l y_i^2 - l_0 \bar{y}^2}.$$

Чем ближе коэффициент детерминации к единице, тем более качественной считается модель.

Поскольку регрессионная матрица в рассматриваемом примере имеет множество сильно коррелированных столбцов, по обучающей части выборки в системе Statistica строилась гребневая регрессия, при этом параметр λ подбирался так, чтобы обеспечить максимум коэффициента детерминации. Проводился отбор значимых регрессоров методами пошаговой регрессии с исключением.

На рис. 2 приведены результаты расчета. Из таблицы следует, что при принятом значении $\lambda = 0,001$ коэффициент детерминации оказался равным $R^2 = 0,72$; модель значима, поскольку значение статистики Фишера $F(7,232) = 85,94$ соответствует вероятности ошибки $p < 0,05$.

Методами пошаговой регрессии программа отобрала семь значимых регрессоров (X1, X4, X7, X10, X13, X14 и X15) из 17. Их значимость следует из того, что значения критерия Стьюдента $t(232)$ соответствуют вероятности ошибки $p < 0,05$.

N=240	Итоги Гребневой регрессии для зависимой переменной: Y4 (22-240+60) =.00100 R= .84951932 R2= .72168308 Скоррект. R2 .71328559 F(7,232)=85,940 p<0,0000 Станд. ошибка оценки: 66,661 Исключенные наблюдения: 241:300					
	БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	В	Ст.Ош. В	t(232)	p-знач.
Св.член			1292,158	182,3952	7,0844	0,000000
X1	0,517522	0,038808	0,709	0,0532	13,3353	0,000000
X4	-0,524149	0,055388	-0,057	0,0060	-9,4632	0,000000
X7	0,446110	0,054188	26,937	3,2720	8,2326	0,000000
X10	0,357107	0,035544	6487,877	645,7684	10,0468	0,000000
X13	-0,259730	0,041161	-1,530	0,2425	-6,3101	0,000000
X14	-0,452516	0,042187	-19,338	1,8029	-10,7265	0,000000
X15	-0,608903	0,035780	-8,247	0,4846	-17,0181	0,000000

Рис. 2. Результаты расчета по линейной регрессионной модели

Регрессионная линейная модель в виде уравнения для расчета прогнозируемых значений температуры ядра пламени может быть представлена в явном виде

$$\tilde{y}_i = 1292,158 + 0,71x_{1i} - 0,057x_{4i} + 26,937x_{7i} + 6487,88x_{10i} - 1,53x_{13i} - 19,34x_{14i} - 8,247x_{16i}.$$

По этой формуле был проведен расчет прогнозируемых значений для тестовой выборки в Excel (рис. 3) и найдено значение средней абсолютной процентной ошибки $MARE = 3,65\%$. Именно это значение и будет сравниваться с результатом по методу «случайный лес».

=1292,158+0,71*A2-0,057*B2+26,937*C2+6487,88*D2-1,53*E2-19,34*F2-8,247*G2										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	x1	x4	x7	x10	x13	x14	x16	y	y-пр	
2	500	0	0	0,2315	527	10	0,1	2190	2148,568	0,018919
3	400	0	0	0,2195	477	10	0,5	2120	2073,067	0,022138
4	400	0	0	0,2315	477	10	1	2185	2146,645	0,017554
5	400	0	0	0,2315	477	10	0,4	2051	2151,593	0,049046
6	400	0	0	0,2315	477	10	0,4	2101	2151,593	0,024081
7	400	0	0	0,2315	477	10	0,4	1710,5	2151,593	0,257896
8	400	0	0	0,2315	477	10	0,4	1622,6	2151,593	0,325987
9	400	4037,5	0	0,2315	477	10	0,4	1980	1921,456	0,029568
10	400	4037,5	0	0,2315	477	10	0,4	2005	1921,456	0,041668
11	400	1211,25	0	0,2315	477	10	0,4	2110	2082,552	0,013008
12	400	1211,25	0	0,2315	477	10	0,4	2097	2082,552	0,00689
13	170	0	0	0,2315	446	15	0,4	1890	1939,023	0,025938
14	300	0	0	0,2315	448	15	0,4	2060	2028,263	0,015406
15	400	0	0	0,2315	450	15	0,4	2160	2096,203	0,029535
16	500	0	0	0,2315	452	15	0,4	2170	2164,143	0,002699
17	170	0	0	0,2315	446	15	0,4	1890	1939,023	0,025938
18	300	0	0	0,2315	448	15	0,4	2021	2028,263	0,003594
19	300	0	0	0,2315	491	14	0,4	1798	1981,813	0,102232

Рис. 3. Прогноз температуры ядра пламени по тестовой выборке

Заметим, что полученный показатель (ошибка 3,65 %) имеет вполне приемлемое значение, несмотря на достаточно низкий коэффициент детерминации $R^2 = 0,72$.

Метод Random Forest для решения задач регрессии

Random Forest, или «случайный лес», – это алгоритм машинного обучения, предложенный Л. Брейманом [11], в нем используется ансамбль решающих деревьев. Алгоритм сочетает в себе бэггинг (случайный выбор с возвращением) и метод случайных подпространств. Он состоит из множества независимых деревьев решений, используется случайная выборка наблюдений из обучающего набора и случайный набор показателей при принятии решений о разбиении узлов.

Точность прогнозирования случайного леса зависит от количества показателей в случайном наборе, объема случайной выборки из обучающего набора, количества деревьев, максимальной глубины деревьев, максимального количества узлов в деревьях, минимального числа объектов в листьях, минимального количества объектов в дочернем узле.

Для решения задачи использовался модуль «Случайный лес» локализованной версии 13.3 пакета Statistica. Настройки показаны на рис. 4: приняты доля тестовой выборки – 0,2 (20 % от всего набора данных), доля подвыборки – 0,5; число случайных показателей (предикторов) – 5 и т.д.

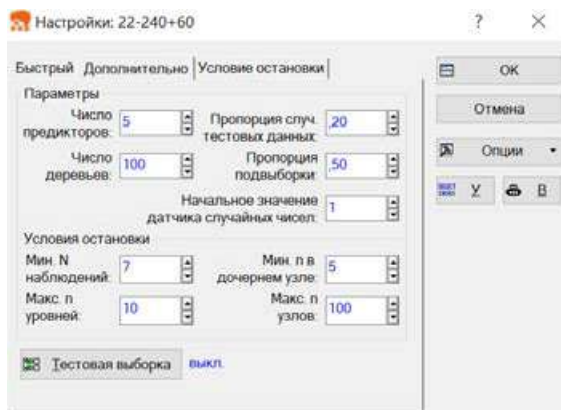


Рис. 4. Настройки случайного леса

На рис. 5 показаны рассчитанные системой Statistica прогнозируемые значения отклика для тестовой выборки по полученной с помощью «случайного леса» модели.

Наблюд. значение	Предсх. значение	Остаток значение	
9	2147,000	2109,643	37,357
13	1891,000	2019,807	-128,807
16	2112,000	2031,759	80,241
21	2182,000	2031,759	150,241
33	1900,000	1993,576	-93,576
40	1900,000	1979,999	-79,999
50	2145,000	2110,017	34,983
53	1803,000	2048,813	-245,813
58	2092,000	2050,056	41,944
59	2120,000	2070,914	49,086
61	2178,000	2111,735	66,265
62	2171,000	2108,018	62,982
63	2089,000	2072,657	16,343
65	1950,000	2015,712	-65,712
73	2145,000	2055,075	89,925
77	2198,000	2108,690	89,310
81	2098,000	2057,409	40,591
87	2191,000	2115,538	75,462
91	1981,000	2032,188	-51,188
93	2121,000	2032,329	88,671
94	2185,000	2029,899	155,101
95	2095,000	2047,814	47,186
111	1955,000	2030,350	-75,350

Рис. 5. Прогнозируемые значения температуры по методу «случайного леса», найденные системой Statistica

По этим данным нетрудно подсчитать значение средней абсолютной процентной ошибки: $MARE = 3,64 \%$. Таким образом, точность полученных моделей оказалась практически одинаковой. Попытки улучшить этот результат путем изменения настроек (см. рис. 4) не дали эффекта.

Заключение

Разработана технология математического моделирования и прогнозирования характеристик качества функционирования технических объектов с использованием двух подходов: линейной регрессии и метода «случайного леса». В рассматриваемом примере оценки качества горелочного устройства по температуре ядра пламени оба подхода дали практически одинаковый и вполне приемлемый результат. Очевидно, что в других задачах эти результаты могут существенно различаться.

Возникает вопрос: какую же из моделей предпочесть? При одинаковой точности предпочтительнее линейная регрессионная модель, поскольку она записана в явном виде. С ее помощью можно анализировать влияние различных факторов на качество работы горелки. Модель «случайного леса» в явном виде не выводится, и проводить такой анализ будет гораздо сложнее.

Список литературы

1. Биргер И. А. Техническая диагностика. 2-е изд. М. : URSS, 2019. 240 с.
2. Северцев Н. А., Бецов А. В., Дарьина А. Н. Методы и модели создания автоматизированных средств контроля для повышения безопасности функционирования технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 2. С. 19–26.
3. Юрков Н. К. Риски отказов сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 1. С. 18–24.
4. Валеев С. Г. Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. М. : Наука, 1991. 272 с.
5. Валеев С. Г., Клячкин В. Н. Практикум по прикладной статистике. Ульяновск : УлГТУ, 2008. 134 с.
6. Боровиков В. П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. 2-е изд. СПб. : Питер, 2003.
7. Kovalnogov V., Fedorov R., Klyachkin V. [et al.]. Applying the Random Forest Method to Improve Burner Efficiency // Mathematics. 2022. № 10. P. 1–25.
8. Neykov M., Liu J. S., Cai T. On the Characterization of a Class of Fisher-Consistent Loss Functions and its Application to Boosting // Journal of Machine Learning Research. 2016. № 17. P. 1–32.
9. Wyner A. J., Olson M., Bleich J., Mease D. Explaining the Success of AdaBoost and Random Forests as Interpolating Classifiers // Journal of Machine Learning Research. 2017. № 18. P. 1–33.
10. Воронина В. В., Михеев А. В., Ярушкина Н. Г., Святов К. В. Теория и практика машинного обучения: учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2017. 290 с.
11. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45, № 1, P. 5–32.

References

1. Birger I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika. 2-e izd. = Technical diagnostics. 2nd ed.* Moscow: URSS, 2019:240. (In Russ.)
2. Severtsev N.A., Betskov A.V., Dar'ina A.N. Methods and models for creating automated controls to improve the safety of technical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2019;(2):19–26. (In Russ.)
3. Yurkov N.K. Risks of failures of complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2014;(1):18–24. (In Russ.)
4. Valeev S.G. *Regressionnoe modelirovanie pri obrabotke nablyudeniy = Regression modeling in the processing of observations.* Moscow: Nauka, 1991:272. (In Russ.)
5. Valeev S.G., Klyachkin V.N. *Praktikum po prikladnoy statistike = Practical training in applied statistics.* Ul'yanovsk: UIGTU, 2008:134. (In Russ.)
6. Borovikov V.P. *STATISTICA. Iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere: dlya professionalov. 2-e izd. = STATISTICS. The art of data analysis on a computer: for professionals. 2nd ed.* Saint Petersburg: Piter, 2003. (In Russ.)
7. Kovalnogov V., Fedorov R., Klyachkin V. et al. Applying the Random Forest Method to Improve Burner Efficiency. *Mathematics.* 2022;(10):1–25.
8. Neykov M., Liu J.S., Cai T. On the Characterization of a Class of Fisher-Consistent Loss Functions and its Application to Boosting. *Journal of Machine Learning Research.* 2016;(17):1–32.
9. Wyner A.J., Olson M., Bleich J., Mease D. Explaining the Success of AdaBoost and Random Forests as Interpolating Classifiers. *Journal of Machine Learning Research.* 2017;(18):1–33.

10. Voronina V.V., Mikheev A.V., Yarushkina N.G., Svyatov K.V. *Teoriya i praktika mashinnogo obucheniya: ucheb. posobie = Theory and practice of machine learning: textbook*. Ul'yanovsk: UIGTU, 2017:290. (In Russ.)
11. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001;45(1):5–32.

Информация об авторах / Information about the authors

Мария Игоревна Корнилова

аспирант,
Ульяновский государственный технический
университет
(Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
E-mail: masha.kornilova.1995@mail.ru

Сергей Викторович Бусыгин

аспирант,
Ульяновский государственный технический
университет
(Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
E-mail: sergey18.06.95@mail.ru

Владислав Николаевич Ковальногов

доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой тепловой и топливной энергетики,
Ульяновский государственный технический
университет
(Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
E-mail: kvn@ulstu.ru

Владимир Николаевич Клячкин

доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры прикладной математики и информатики,
Ульяновский государственный технический
университет
(Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
E-mail: v_kl@mail.ru

Maria I. Kornilova

Postgraduate student,
Ulyanovsk State Technical University
(32 Severny Venets street, Ulyanovsk, Russia)

Sergey V. Busygin

Postgraduate student,
Ulyanovsk State Technical University
(32 Severny Venets street, Ulyanovsk, Russia)

Vladislav N. Kovalnogov

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department
of thermal and fuel energy,
Ulyanovsk State Technical University
(32 Severny Venets street, Ulyanovsk, Russia)

Vladimir N. Klyachkin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of applied mathematics and informatics,
Ulyanovsk State Technical University
(32 Severny Venets street, Ulyanovsk, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 20.08.2023

Поступила после рецензирования / Revised 30.08.2023

Принята к публикации / Accepted 15.09.2023

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 159.9+629.7

doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-15

ПРОФАЙЛИНГ КАК ТЕХНОЛОГИЯ В СИСТЕМЕ АВИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭРОПОРТА

**А. К. Бейсенбаева¹, Д. С. Ергалиев², М. А. Богачева³,
Е. С. Сулейманова⁴, А. М. Мухамбетов⁵**

^{1, 2, 3} Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

⁴ Авиационный колледж при Академии гражданской авиации, Алматы, Казахстан

⁵ Военный институт Сил Воздушной обороны Республики Казахстан, Актобе, Казахстан

¹ baigulk.75@mail.ru, ² DES-67@yandex.kz, ³ marina-bogacheva@inbox.ru,

⁴ elenasulemann21@mail.ru, ⁵ suimbayeva@internet.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современное состояние казахстанских аэропортов показывает их обеспеченность сложным техническим оборудованием, позволяющие 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. *Материалы и методы.* Поэтому приветствуется использование профайлинга как психологического метода экспресс-диагностики выявляющего потенциально опасного человека. Применение данного приема на практике с целью обеспечения безопасности требует подготовленности сотрудников Служб авиационной безопасности для чего и был разработан учебный курс «Авиационный профайлинг», представленный авторами в статье. *Результаты и выводы.* Практическая значимость результатов заключается в том, что качественно подготовленные специалисты могут эффективно использовать технологию профайлинга как способ по предупреждению актов незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации.

Ключевые слова: авиационная безопасность, акт незаконного вмешательства (АНВ), профайлинг, терроризм

Для цитирования: Бейсенбаева А. К., Ергалиев Д. С., Богачева М. А., Сулейманова Е. С., Мухамбетов А. М. Профайлинг как технология в системе авиационной безопасности аэропорта // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 159–164. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-15

PROFILING AS A TECHNOLOGY IN THE AIRPORT AVIATION SECURITY SYSTEM

**A.K. Beysenbaeva¹, D.S. Ergaliev², M.A. Bogacheva³,
E.S. Suleymanova⁴, A.M. Mukhambetov⁵**

^{1, 2, 3} Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan

⁴ Aviation College at the Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan

⁵ Military Institute of the Air Defense Forces of the Republic of Kazakhstan, Aktobe, Kazakhstan

¹ baigulk.75@mail.ru, ² DES-67@yandex.kz, ³ marina-bogacheva@inbox.ru,

⁴ elenasulemann21@mail.ru, ⁵ suimbayeva@internet.ru

Abstract. Background. The current state of Kazakhstan's airports shows that they are equipped with sophisticated technical equipment that allows them to track, identify, recognize faces, and identify items prohibited for transportation. All these procedures allow for high-quality control of passengers. *Materials and methods.* However, evolving threats to aviation security require innovative approaches and immediate solutions. Therefore, the use of profiling as a psychological method of express diagnostics that identifies a potentially dangerous person is encouraged. The application of this technique in practice in order. Ho to ensure safety requires the preparedness of Aviation Security Services employees, for which the training course «Aviation Profiling» was developed, presented by the authors in the article. *Results and conclusions.* The practical significance of the results lies in the fact that well-trained specialists can effectively use profiling technology as a way to prevent acts of unlawful interference in civil aviation activities.

Keywords: aviation security, act of unlawful interference (ANV), profiling, terrorism

For citation: Beysenbaeva A.K., Ergaliev D.S., Bogacheva M.A., Suleymanova E.S., Mukhambetov A.M. Profiling as a technology in the airport aviation security system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):159–164. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-15

Введение

В настоящее время на территории многих современных развитых и развивающихся стран предпринимаются различные меры по повышению уровня авиационной безопасности.

Предпосылкой к повышению уровня авиационной безопасности являются требования ИКАО, связанные с требованиями, предусматривающими обеспечение мер безопасности по отношению к пассажирам и ручной клади [1]. Наряду с этим кадровый профайлинг способствует удовлетворению контроля угроз ошибок согласно первому приложению ИКАО [2].

Учитывая постоянно растущий объем воздушных перевозок согласно национальному статистическому агентству Республики Казахстан, возможность обеспечения авиационной безопасности постепенно снижается из-за дефицита квалифицированных кадров [3].

Основная часть

Современный мир становится все более угрожающим, одна из основных угроз – терроризм. Серьезной угрозой общественной безопасности стал всплеск актов терроризма во всем мире. Терроризм представляет собой один из самых опасных и сложных явлений современности, приобретающий все более угрожающие масштабы.

Увеличение актов терроризма в мире становится одной из основных проблем современности, поскольку данное негативное явление характеризуется высокой степенью общественной опасности.

Террор подрывает основы общества, дестабилизирует политическую и экономическую ситуацию в стране, снижает авторитет государственной власти и управления, влечет массовые человеческие жертвы, причиняет значительный материальный ущерб и резко ухудшает криминогенную обстановку, разрушает культурные и духовные ценности, порождает недоверие и ненависть между социальными и национальными группами.

Современное общество внутренне противоречиво. Различия и несовпадения интересов среди различных групп населения страны ведут к появлению очагов напряженности, конфликтов и социальных изменений.

Современное состояние общественной жизни в Республике Казахстан характеризуется нестабильностью в социально-экономической сфере, а следовательно, к значительным изменениям в структуре преступности, что является благоприятной почвой для вербовки граждан Казахстана в организации, которые используют методы террора для свержения существующего государственного строя и создания террористических ячеек на территории нашей страны. При этом практика показывает, что экономическое положение преступников не всегда является решающим фактором для совершения противоправных действий.

К другим факторам можно отнести высокий уровень коррупции, отсутствие социальных лифтов и плохое качество образования молодежи из сельской местности и малых городов, религиозную безграмотность, бесконтрольный доступ со стороны родителей подростков к социальным сетям, желание молодых людей как можно быстрее прославиться – «хайпануть».

Практика показывает, что эффективность правоохранительной деятельности в борьбе с преступностью и терроризмом непосредственно связана с качественным уровнем профессиональной подготовки специалистов, прошедших обучение по специальным программам, которые включают обучение технологии профайлинга. Поэтому с целью повышения профессионального уровня инспекторов-профайлеров и сотрудников служб авиационной безопасности в рамках имеющейся

квалификации с формированием компетенций, обеспечивающих оперативное распознавание лиц, вынашивающих противоправные замыслы, разработан и сертифицирован Авиационной администрацией Казахстана учебный курс «Авиационный профайлинг» в объеме 30 часов (табл. 1). Курс проводится на базе учебного центра авиационной безопасности ИКАО (УЦАБ ИКАО). По итогам обучения учебным центром выдается сертификат сроком действия два года. Обучение проводится в соответствии с рекомендациями «Руководства по авиационной безопасности» ИКАО [4].

Таблица 1

Тематический план занятий

Наименование модуля	Количество часов		
	Теоретические занятия	Практические занятия	Всего
Профайлинг в обеспечении безопасности на воздушном транспорте	3	–	3
Оперативная психодиагностика. Оперативные методы выявления лжи	6	3	9
Основы ведения опросной беседы	3	3	6
Выявление манипуляционного воздействия и защита от него	2	2	4
Профильные характеристики выявления потенциально опасных лиц, террористов	3	4	7
Экзамен (тестирование)	1		

Обучение проводится согласно приказам Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан № 322 от 26 марта 2015 г. «Перечень должностей руководителей и специалистов служб авиационной безопасности организаций гражданской авиации Республики Казахстан, а также квалификационные требования к таким должностям» и № 1083 от 24 ноября 2015 г. «Об утверждении Программы подготовки и переподготовки специалистов служб авиационной безопасности, должностных лиц уполномоченного органа в сфере гражданской авиации по вопросам авиационной безопасности и безопасности полетов», требований «Методических рекомендаций по применению профайлинга в системе авиационной безопасности аэропортов РК», утвержденных председателем Комитета ГА МИР РК от 9 августа 2016 г. [5, 6].

В результате обучения инспекторы-профайлеры и сотрудники служб авиационной безопасности научатся строить социально-психологические и профессиональные отношения с учетом этнических отличий, определять связь психологических особенностей личности с его внешними данными.

Профайлинг может стать сильным оружием в борьбе с терроризмом. В настоящее время для преступных группировок характерны высокий уровень конспирации и активная реализация контрмер высокого профессионального уровня в отношении правоохранительных органов.

Противозаконные акции, совершаемые ими, как правило, тщательно подготавливаются, они являются частью общего плана действий группировки и обязательно учитывают соотношение спроса и предложения в обществе на протестные и оппозиционные взгляды. Невозможно эффективно выявить потенциального террориста или диверсанта, используя только досмотровую технику. Она не позволяет решить многие проблемы, особенно в условиях военных действий или при общении с личностью, подчеркивающей свою неприкосновенность и высокий социальный статус.

Профайлинг – технология, направленная на предотвращение актов незаконного вмешательства по средством выявления потенциально опасных лиц и ситуаций с применением методов прикладной психологии [7].

Оперативная психодиагностика – определение наличия и степени выраженности у человека определенных психологических признаков. Объектом психодиагностики могут являться психологические и эмоциональные состояния, черты личности, вербальные проявления, верификация лжи и т.д. [8].

Эффективным способом становится применение техник, использующих способности человека к считыванию и восприятию невербальной и вербальной информации, выявлению отклонений в поведении, определению угрозы противоправных действий.

Современный профайлинг использует несколько методов, каждый из которых имеет самостоятельное значение, а именно:

- проведение опроса;
- считывание мимики и иных невербальных проявлений;
- составление психологического портрета;
- определение лжи;
- прогнозирование возможного поведения;
- досмотр людей, имущества, грузов;
- принятие оперативного решения.

Подготовка современных профайлеров – процесс, опирающийся не только и не столько на трансляцию профессиональных знаний и умений (технологий), психологическое образование, сколько на формирование общечеловеческих ценностей, духовно-нравственных, этических императивов.

Профилирование – сложное, полиморфное явление, связанное с диагностикой особенностей разных типов и групп людей в отношении оценки их личностных, межличностных, психологических и нравственных качеств и компетенций, знаний и умений, способов построения и преобразования отношений с собой и миром [8].

Профилирование формируется на «стыке» психодиагностической и коррекционной работы, оно есть психодиагностика, направленная на оперативную коррекцию активности человека. Это – ориентировочная деятельность, деятельность понимания сути происходящего.

В профилировании может не быть «прямых» клиентов: запрос о профиле «третьего» лица или группы лиц, или о реконструкции / проекции ситуации может поступать из самых разных источников. Речь скорее идет о заказчиках и исполнителях. «Объект» исследования может быть, а может и не быть его активным участником, сотрудничать или мешать исследованию.

Можно отнести профилирование к «экспертной психодиагностике», не предполагающей прямого, целенаправленного психокорректирующего воздействия на обследуемые объекты.

Однако в реальности люди не могут не взаимодействовать, а этот аспект как «эффект испытуемого» или «эффект экспериментатора» многократно отражен в исследованиях по методологии и методам психодиагностического и, шире, психологического исследования.

Другими словами, задача профилирования – оперативно выделять из потока людей, потенциально опасных или представляющих угрозу субъектов, а также склонных к противоправным действиям.

Опыт борьбы с ликвидацией и зачисткой территорий от террористических бандформирований приводит к необходимости военного присутствия армейских подразделений и проведения войсковых спецопераций, разъяснительной работы с местным населением и представителями власти на местах, которые порой находились под длительным присутствием или влиянием террористов. В этих условиях большая ответственность для налаживания нормальной мирной жизни ложится именно на представителей военных администраций и представителей спецподразделений.

Заключение

В связи с вышеизложенным следует подчеркнуть роль профессиональной подготовки сотрудников спецподразделений в процессе выявления потенциально опасных лиц, их личные и психоэмоциональные характеристики. При приеме на работу этой категории специалистов необходимо проводить психологическое тестирование на выявление лиц «уязвимых» или легко поддающихся влиянию, готовых по различным причинам вступить в сговор с преступниками и террористами. Для этого необходимо уделять большое внимание подготовке кадров и материально-техническому оснащению современными средствами и технологиями тестирования.

Внедрение технологии профайлинга и подготовка профессиональных профайлеров должны войти в единую и комплексную систему безопасности государства. Для этого необходимо создание единого государственного научно-практического центра, в который будут входить региональные и отраслевые учебно-практические центры в различных сферах деятельности, где безопасность является стратегическим фактором национальной безопасности Республики Казахстан – транспорт, армия, флот, структуры национальной и экономической безопасности, структуры Министерства внутренних дел. Создание таких центров не противоречит закону Республики Казахстан «О противодействии терроризму».

Как пример организационной структуры для создания учебных центров «профайлинга» рекомендуем изучить положительный и многолетний опыт работы аккредитованных авиационных учебных центров ИКАО (Международной организации гражданской авиации и ИАТА, Международной ассоциации воздушного транспорта) при подготовке и поддержанию профессиональной квалификации авиационных специалистов.

Список литературы

1. Приложение № 17 к Конвенции ИКАО – Безопасность. Защита международной гражданской авиации от актов незаконного вмешательства. Изд. девятое. Монреаль, Квебек, Канада, 2011.
2. Приложение № 1 к Конвенции ИКАО – Выдача свидетельств авиационному персоналу. Изд. четырнадцатое. Монреаль, Квебек, Канада, 2022.
3. Основные показатели работы транспорта в Республике Казахстан. – Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. URL: <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-transport/publications/6021/>
4. Руководство по авиационной безопасности ИКАО. URL: https://caa.gov.kz/storage/app/media/updated%20apps%20for%20ICAO%20Convention/AN17_Авиационная%20безопасность%202022%20ed.pdf
5. Перечень должностей руководителей и специалистов служб авиационной безопасности организаций гражданской авиации Республики Казахстан, а также квалификационных требований к таким должностям. Утверждены Приказом исполняющего обязанности Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан № 322 от 26 марта 2015 года. URL: <https://gos24.kz/blog/2325>
6. Учебная программа подготовки и переподготовки по авиационной безопасности. Утверждена Приказом исполняющего обязанности Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан № 1083 от 24 ноября 2015 года. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500012568>
7. Авиационная безопасность : учеб. пособие / под ред. Ю. М. Волынского-Басманова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : АБИНТЕХ, 2005.
8. Дормидонтов А. В., Семенова И. А. Профайлинг : учеб.-метод. пособие. Ульяновск, 2012. 109 с.
9. Аппазова Ш., Муканова К., Советкажиев А. [и др.]. Физико-математические методы и модели обеспечения надежности, качества, информационной безопасности // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 56–58.
10. Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Омаржанова Г. К. [и др.]. Системные методы обеспечения надежности и безопасности биологических и киберфизических систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 2. С. 241–243.

References

1. *Prilozhenie № 17 k Konventsii ICAO – Bezopasnost'. Zashchita mezhdunarodnoy grazhdanskoj aviatsii ot aktov nezakonnogo vmeshatel'stva. Izd. devyatoe = Annex No. 17 to the ICAO Convention – Security. Protection of international civil aviation from acts of unlawful interference. The ninth edition.* Montreal, Quebec, Canada, 2011. (In Russ.)
2. *Prilozhenie № 1 k Konveksii ICAO – Vydacha svidetel'stv aviatsionnomu personalu. Izd. Chetyrnadsatoe = Annex No. 1 to the ICAO Convention – Issuance of certificates to aviation personnel. The fourteenth edition.* Montreal, Quebec, Canada, 2022. (In Russ.)
3. *Osnovnye pokazateli raboty transporta v Respublike Kazakhstan. – Byuro natsional'noy statistiki Agentstva po strategicheskomu planirovaniyu i reformam Respubliki Kazakhstan = The main indicators of transport in the Republic of Kazakhstan. – Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan.* (In Russ.). Available at: <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-transport/publications/6021/>
4. *Rukovodstvo po aviatsionnoy bezopasnosti IKAO = ICAO Aviation Safety Manual.* (In Russ.). Available at: https://caa.gov.kz/storage/app/media/updated%20apps%20for%20ICAO%20Convention/AN17_Авиационная%20безопасность%202022%20ed.pdf
5. *Perechen' dolzhnostey rukovoditeley i spetsialistov sluzhb aviatsionnoy bezopasnosti organizatsiy grazhdanskoj aviatsii Respubliki Kazakhstan, a takzhe kvalifikatsionnykh trebovaniy k takim dolzhnostyam. Uverzhdeny Priказом исполняющего обязанности Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан № 322 от 26 марта 2015 года = The list of positions of heads and specialists of aviation security services of civil aviation organizations of the Republic of Kazakhstan, as well as qualification requirements for such positions. Approved by the Order of the Acting Minister for Investment and Development of the Republic of Kazakhstan No. 322 dated March 26, 2015.* (In Russ.). Available at: <https://gos24.kz/blog/2325>
6. *Uchebnaya programma podgotovki i perepodgotovki po aviatsionnoy bezopasnosti. Uverzhdena Приказом исполняющего обязанности Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан № 1083 от 24 ноябрия 2015 года = The training and retraining program for aviation security. Approved by the Order of the Acting Minister for Investment and Development of the Republic of Kazakhstan No. 1083 dated November 24, 2015.* (In Russ.). Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500012568>
7. Volynskiy-Basmanov Yu.M. (ed.). *Авиационная безопасность': учеб. пособие. 2-е изд. перераб. и доп. = Aviation safety: textbook. 2nd ed. reprint. and add.* Moscow: ABINTEKh, 2005. (In Russ.)
8. Dormidontov A.V., Semenova I.A. *Profayling: учеб.-метод. пособие = Profiling : an educational and methodological manual.* Ul'yanovsk, 2012:109. (In Russ.)

9. Appazova Sh., Mukanova K., Sovetkashiev A. et al. Physico-mathematical methods and models for ensuring reliability, quality, information security. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:56–58. (In Russ.)
10. Tulegulov A.D., Ergaliev D.S., Omarzhanova G.K. et al. System methods for ensuring reliability and safety of biological and cyberphysical systems // *Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020. Vol. 2. pp. 241-243. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;2:241–243. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Айгуль Калтаевна Бейсенбаева

кандидат педагогических наук, доцент,
заведующий кафедрой
общеобразовательных дисциплин,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: baigulk.75@mail.ru

Дастан Сырымович Ергалиев

кандидат технических наук, профессор кафедры
авиационной техники и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: DES-67@yandex.kz

Марина Алексеевна Богачева

преподаватель-исследователь кафедры
общеобразовательных дисциплин,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: marina-bogacheva@inbox.ru

Елена Сергеевна Сулейманова

преподаватель, магистр технических наук,
Авиационный колледж
при Академии гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: elenasulemann21@mail.ru

Асылбек Маратович Мухамбетов

старший офицер по (ВиИР) отдела связи
и радиотехнического обеспечения,
Военный институт Сил Воздушной обороны
Республики Казахстан
(Казахстан, г. Актобе пр-кт А. Молдагуловой, 16)
E-mail: suimbayeva@internet.ru

Aigul K. Beisenbayeva

Candidate of pedagogical sciences, associate professor,
head of the sub-department
of general education disciplines,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetov street, Almaty, Kazakhstan)

Dastan S. Ergaliev

Candidate of technical sciences,
professor of the sub-department
of aviation technology and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetov street, Almaty, Kazakhstan)

Marina A. Bogacheva

Lecturer-researcher of the sub-department
of general education disciplines,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetov street, Almaty, Kazakhstan)

Elena S. Suleymanova

Lecturer, master of technical sciences,
Aviation College at the Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetov street, Almaty, Kazakhstan)

Asylbek M. Mukhambetov

Senior officer for V&I communications
and radio engineering support department,
Military Institute of the Air Defense Forces
of the Republic of Kazakhstan
(16 A. Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

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

Поступила в редакцию / Received 05.09.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.09.2023

Принята к публикации / Accepted 05.10.2023

APPLICATION OF THE IGNATYEV ADAPTATIVE MAXIMUM PRINCIPLE IN MANAGEMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURES RESILIENCE

A.V. Masloboev

Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia;
Nanomaterials Research Centre of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia
masloboev@iimm.ru

Abstract. *Background.* 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. *Materials and methods.* The fundamentals of current research are the theory of holonomic and invariant automatic systems and the method of linguo-combinatorial modeling of organizational and technical systems, proposed by Professor Mikhail B. Ignatyev back in 1963. This theoretical basis provides the modern concept advancement of complex systems resilience in terms of formalizing and structuring the methodology and objectives of managing this immanent attribute (capacity) of self-preservation of these systems. *Results and conclusions.* The issues of applicability of linguo-combinatorial models for situational management of critical infrastructures and the dynamics of their adaptative characteristics are examined. A novel linguo-combinatorial model for managing the critical infrastructure resilience, formalized in the form of an equivalent system of differential equations with arbitrary coefficients, is proposed. The model can be used by critical infrastructures operators to study the system behavior and develop control actions aimed at maintaining the system performance characteristics in the range of its adaptative capabilities under various operating conditions and critical-case scenarios of adverse events via launching stabilization and coordination mechanisms that implement combined control by deviation and external disturbance.

Keywords: critical infrastructure, resilience, safety, management, system, adaptative capacity, linguo-combinatorial model

Financing: the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling KSC RAS (project No. FMEZ-2022-0023).

Acknowledgments: The author is deeply obliged to Professor Mikhail B. Ignatyev for the idea of applying the methodology of linguo-combinatorial modeling to the management problems of regional security and resilience of critical infrastructures, expressed at the end of 2018.

For citation: Masloboev A.V. Application of the Ignatyev adaptative maximum principle in management of critical infrastructures resilience. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):165–178. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-16

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА АДАПТАЦИОННОГО МАКСИМУМА ИГНАТЬЕВА В УПРАВЛЕНИИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬЮ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР

А. В. Маслобоев

Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального
исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия;
Центр наноматериаловедения Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия
masloboev@iimm.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Работа направлена на адаптацию и применение современных кибернетических методов анализа сложных динамических систем с целью повышения эффективности управления жизнеспособностью и безопасностью региональных критических инфраструктур и расширения аналитических возможностей систем поддержки принятия решений в этой сфере. Актуальность этой задачи обусловлена отсутствием единой методологической базы и наилучших практик поддержания устойчивого функционирования критических инфраструктур различного уровня и типа в условиях неопределенности и риска. *Материалы и методы.* Фундаментальной основой настоящего исследования является теория голономных и инвариантных автоматических систем, а также метод лингво-комбинаторного моделирования организационных и технических систем, предложенный профессором М. Б. Игнатьевым еще в 1963 г. Этот теоретический базис обеспечивает развитие современной концепции жизнеспособности сложных систем в части формализации и структурирования методологии и задач управления данным имманентным свойством самосохранения этих систем. *Результаты и выводы.* Исследованы вопросы применимости лингво-комбинаторных моделей для ситуационного управления критическими инфраструктурами и динамикой их адаптационных характеристик. Предложена новая лингво-комбинаторная модель управления жизнеспособностью критической инфраструктуры, формализованная в форме эквивалентной системы дифференциальных уравнений с произвольными коэффициентами. Модель может быть использована операторами критических инфраструктур для анализа поведения системы и выработки управляющих воздействий, направленных на удержание рабочих характеристик системы в зоне ее адаптационных возможностей при различных условиях функционирования и сценариях развития критических ситуаций посредством запуска механизмов стабилизации и координации, реализующих комбинированное управление по отклонению и по внешнему возмущению.

Ключевые слова: критическая инфраструктура, жизнеспособность, безопасность, управление, система, адаптационная возможность, лингво-комбинаторная модель

Финансирование: работа выполнена в рамках государственных заданий ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0023).

Благодарность: автор глубоко признателен профессору М. Б. Игнатьеву за идею применения метода лингво-комбинаторного моделирования к задачам управления региональной безопасностью и жизнеспособностью критических инфраструктур, сформулированную в конце 2018 г.

Для цитирования: Маслобоев А. В. Применение принципа адаптационного максимума Игнатьева в управлении жизнеспособностью критических инфраструктур // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 165–178. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-16

Introduction

Critical infrastructures have become a phenomenon of the modern age. The government and authorities of the Russian Federation are preparing different measures to improve the security level of its critical infrastructures. A number of public documents establishing the strategic development goals of the state and ways to achieve these goals indicate the necessity of increasing the level of safety and protectability of critical facilities and infrastructures as one of the principal objectives. A major role in solving this problem is given to modern information technologies and modeling aids, the use of artificial intelligence methods and Big Data processing technologies that in aggregate allow the engineering of smart information and analytical systems intended for the decision-making support in the field of security management of critical infrastructures. Critical infrastructures, including energy, transport, social, etc. sectors and facilities are playing a central role in the state-of-the-art risk management when facing both man-made and natural hazards, and the threats in civil and military-political areas.

Meanwhile, the concept “critical infrastructure” itself is collective. It covers various scopes of human activity, which are interconnected and declare the issues of preserving the vital functions of the state, the society and the individuals. In line with European Council Directive 2008 [1], the most common definition of critical infrastructure is the follows: critical infrastructure means an asset, system or part thereof, which is essential for the maintenance of vital societal functions, health, safety, security, economic or social well-being of people, and the disruption or destruction of which would have a significant impact as a result of the failure to maintain those functions.

Adverse disruptive events such as current geopolitical situation in the world have shown that risk management and security ensuring are not enough to protect socio-economic, organizational and technical systems and their critical infrastructures against multiple threats. An important factor of risk management for the purpose of critical infrastructure protection is continually strengthening its resilience [2]. Therefore, recently, critical infrastructures operators, safety analysts and risk managers have moved their attention from engineering a robust critical infrastructure by risk management to establish a resilient critical infrastructure

using resilience management [3, 4]. Robust systems experience sudden failure in case of disruption and lose their core value, while resilient systems absorb the adverse impacts, adapt to and recover their desired performance level after a disruption [5].

The concept of resilience has spread from ecological systems into other domains [6]. Broadly speaking, the resilience of critical infrastructure is understood as a system's ability that reduces its vulnerability, minimizes the consequences of active threats, accelerates response and rapid recovery, and facilitates adaptation to the given or potentially disruptive events [7]. In regard to [8], the resilience of critical infrastructure is defined as the ability of a system exposed to hazards to resist, absorb, accommodate to and recover from the effects of a hazard in a timely and efficient manner, for the preservation and restoration of essential services. To date, the resilience concept has been adopted and introduced in various subject fields that have led to the definition of specific domains (types) of resilience: public (community resilience, societal resilience, human resilience), economic (socio-economic resilience), engineering (technological resilience, infrastructure resilience), environmental (ecological resilience), etc. Within the bounds of the each resilience domain and type, particular characteristics of the system, processes and phenomena that are most significant in the context of solving a specific research problem are studied. In most cases, the connection between the type of system resilience being studied and other related resilience domains is omitted from examination. Allowing that critical infrastructure is a complex dynamic system, an isolated consideration of particular resilience domains, on the one hand, may overlook synergistic effects and the emergence of new emergent attributes that improve the overall system resilience, and on the other hand, the risk of a chain reaction of violations or cascade effects, leading to a reduction of system resilience level. Thus, in recent years, the popularity of critical infrastructure resilience has exploded in both academic and policy discourses.

A review of domestic scientific literature showed that systematic research of the agenda of critical infrastructures resilience in Russia has not previously been carried out. At once, domestic studies with varying level of detail touch upon certain types of system resilience in such related fields of research as reliability theory, risk analysis, global safety, crisis management and others. A distinctive feature of domestic resilience studies in comparison with foreign ones is the focus on the processes and systems being analyzed. Foreign research projects are addressed to the individual and civil society when solving the control problems of critical infrastructure resilience, while Russian research programs substantially adhere to the state interests and strategies in these issues.

The study of the state-of-the-art management problems of critical infrastructures resilience reveals that methodological approaches to formalizing, modeling and estimating the resilience of critical infrastructures have not been sufficiently developed. At the same time, the practical absence of a unified mathematical apparatus for integrating existing solutions in the field of information technology for managing the critical infrastructures resilience in the context of the transition to a digital economy makes it difficult to design and apply effective methods and facilities for decision-making support in this area. This determines the relevance of developing new methodologies and tools for managing the critical infrastructures resilience on the basis of integration, adaptation and advancement of known models and techniques for ensuring the security of complex systems. Due to the wide range of both the various methods and techniques for analyzing critical infrastructures resilience covering specific resilience domains, and the widespread various models used to estimate the overall system resilience, however, there is still a lack of exact and comprehensive simulation methodology to quantify, measure and control the resilience of critical infrastructures combining these resilience domains into one framework. The other urgent problem on-path efficient resilience analysis is a lack of complete and valid operating historical data and on-line information on the state dynamics of the critical infrastructure performance characteristics.

Thus, the current study pursues an attempt to develop and apply a methodology to manage and analyze the resilience of critical infrastructures on the basis of conjugation of the cybernetic methods, linguo-combinatorial modeling and theory of holonomic automatic system. By adopting this methodology, system resilience backbone capabilities and the influencing situational factors can be modeled effectively. The proposed linguo-combinatorial model formulated on the basis of this methodology for resilience management of critical infrastructures allows explaining numerous facts and patterns in the behavior of these systems, as well as predicting and adjusting the trajectory of their development based on the control principle of system convergence to adaptative maximum.

Materials and methods

The linguo-combinatorial modeling methodology designed for examining the ill-formalized complex systems was proposed by Professor Mikhail B. Ignatyev in his fundamental study [9] in 1963. Generally, this

research was devoted to foundations of the holonomic automatic systems and their applications. As from here on, the developed methodology has been successfully adopted and introduced in various applications, e.g., the control problems of pilotless vehicles, the coordination of cyber-physical and robotic systems, smart cities, the synthesis of physicochemical reactions and atomic-molecular systems, the simulation of organism to reduce medical errors, cybernetic geology, meteorology and economics, regional security, the modeling of climate change and the atmosphere, the engineering of high-performance computing systems, Internet of Things and virtual worlds, the in-depth analysis of biological, technical and organizational systems, etc. The initial premise of the linguo-combinatorial modeling methodology is to solve management and coordination problems of complex dynamic systems by retaining these systems in the range of their adaptive capabilities, so-called adaptative optimum (maximum) [10, 11]. The used research methodology that we follow in our study is just the same and is based on general control theory (cybernetics), system analysis (systems approach), model theory (simulation), safety science (risk management) and system stability theory (resilience concept).

To provide the efficient resilience management of real critical infrastructures, first-priority objective is system resilience modeling and analysis that should be undertaken. It is quite difficult to evaluate and compare the known modeling methodologies of system resilience considering that the methodologies are designed for a specific context and are not aiming to achieve the same goal. Nevertheless, all existing methodologies have their own validity, highs and lows, and the linguo-combinatorial modeling is well-fit for leveling possessed shortcomings in so far as it is possible. Though, the present resilience studies are not so detailed regarding the use of linguo-combinatorial modeling in resilience management problem-solving.

When managing the resilience of complex systems, such as most critical infrastructures, the decision makers and operators mainly use conventional methods and special-purpose tools based on formulations and models of the last century and their state-of-the-art modifications. Meanwhile, the models and tools themselves must include the capability of information control. This is the main point and scope of the information support of making managerial decisions in the field of safety and resilience ensuring.

A drawback of the modern resilience concept is that an event is considered reliable if it is reproducible. In complex organizational systems, especially, socio-economic ones, it is almost impossible to ensure repeatability of similar critical events. The manner and nature of each critical situation are very individual. It is only arguable that there are utterly few repeating phenomena in operation of socio-economic systems. To manage the resilience of such class of systems, not only reproducible information is significant and needed, but also non-reproducible data.

Any subject field is based on models of real processes designed on the basis of expert knowledge. Moreover, in each field these models have different completeness of formalization, but they all use natural language for conceptualization. Natural language is considered as a universal simulation machine (modeling system). Modeling theory should help to deal with still unsolved problems. One of such a problem is the resilience management of socio-economic systems and, in particular, critical infrastructures. These systems belong to the class of ill-formalized systems. Therefore, in order to develop new and adapt known models and methods of information support and turn them into an end-to-end technology for resilience management of critical infrastructures, it is necessary to perform the large-scale efforts to describe and formalize these systems in the form of strict and further applicable formulations. Thereto, the following actions are required:

- to formulate expert knowledge on the observable subject field or entity in natural language;
- to describe situations and problems within the given subject field in natural language;
- to design a mathematical model of a system or control object;
- to assign a problem statement in the relational language using relationships and correlations;
- to translate mathematical formulations into one of known useable programming languages;
- to implement the program code on a computer in the language of a specific machine;
- to obtain the results of the problem solved in the result language: textual, tabular, graphical, animated, etc.

The principal problem of conceptual modeling ill-formalized systems is how to shift from a description in natural language to a description in the relational language using basic relationships and correlations. To solve this problem effectively, the linguo-combinatorial modeling methodology [10] based on the use of keywords and basic concepts that are specific to the subject field under consideration can be well-applied. The typical linguo-combinatorial model consists of three groups of variables: characteristics of basic concepts, changes in these key characteristics, and structured uncertainty in equivalent equations, which can be used for system control and adaptation.

When studying complex dynamic systems, a central issue is the choice of system description language for defining elements and relationships of these systems. As a system description language in linguo-combinatorial modeling methodology, the natural language as a universal sign system that allows considering a wide class of systems, including ill-formalized ones, is used. The main feature of natural language is the designation of words and the implication of meanings. This difficulty is overcome by formally introducing the concept of the meaning of words as factors of these words in the original phrase and by transition to a linguistic equation, which makes it possible to construct a calculus of meanings. Such an approach can be applied to the analysis of the entire corpus of natural language texts. Meaning mining is a time-consuming problem both for modelers and for high-end computers. Relying on domain-specific keywords, this approach can also be used to synthesis new models for that knowledge domain. In this case, linguo-combinatorial modeling expects identifying keywords in a specific subject field combined into phrases on the basis of which equivalent systems of equations with arbitrary coefficients are constructed. In a particular case, it can be differential equations and a well-known mathematical apparatus can be used to test it. In practice, the linguo-combinatorial modeling methodology is an effective heuristic device to analysis of ill-formalized systems and design of their conceptual models before running the simulation [11]. Such a heuristic device applies to conceptual models with a large number of words and phrases and the constructed set of models needs to be examined for adequacy and completeness.

Linguo-combinatorial models provide the possibility of constructing a calculus of meanings that can be easily and well-implemented on computers. The definition of meaning includes two significant characteristics: contextuality (meanings are calculated based on the abstract or applied context) and intentionality (arbitrary coefficients allow assigning such and such certain aspirations). As a result, the analysis problem of complex systems solved using linguo-combinatorial modeling methodology is reduced to the study of equivalent equations with arbitrary coefficients. In [9] it was proven that the number of these arbitrary coefficients is equal to the number of combinations of n by $m+1$, where n is the number of system variables (the number of different words in the original phrases); m is the number of restrictions imposed on the variables describing the system (the number of different phrases). The following crucial conclusions can be drawn from the analysis of this formulation. Firstly, for all multidimensional systems with more than six variables, there is an optimum in the number of arbitrary coefficients in the structure of equivalent equations. Arbitrary coefficients are used to control the system, preserve and adapt it under external disturbances. This optimum is called the phenomenon of adaptative maximum [9]. The principle of resilient managing of the complex dynamic systems is that the systems must be controlled in such a way as to retain it in the range of adaptative maximum under changing environment. Secondly, to maintain the system performance, mobility and flexibility in the range of adaptative maximum, it is necessary to impose and remove restrictions, to increase the number of variables, degrees of freedom and coordinates of system basis, as well as to integrate or compose systems into the higher-level complexes.

For instance, let's consider two critical infrastructure systems, which are a part of regional critical infrastructure as such:

$$CIS_1 = C_{n_1}^{m_1+1}, \quad CIS_2 = C_{n_2}^{m_2+1}, \quad CIS_1 \subseteq RCI, \quad CCIS_2 \subseteq RCI, \quad (1)$$

where n_1 and n_2 are the number of variables in the systems, respectively; m_1 and m_2 are the number of restricting manifolds imposed on the system variables, respectively; s_1 and s_2 are the number of arbitrary coefficients in the structures of equivalent equations, respectively.

Then, by superposition of common restricting manifolds m_{int} , a unified covering system, so-called integrated complex or joint ensemble, as a result is constructed. This unified complex can be expressed by the following formulation:

$$CIS_{int} = C_{n_1+n_2}^{m_1+m_2+m_{col}+1}. \quad (2)$$

Meanwhile, depending on specific parameters, two cases are possible in terms of increase in system adaptative capabilities:

1. When integration and unification into an ensemble is advisable and leads to an increase in the adaptative capabilities of the entire system and the original systems: $CIS_{int} > CIS_1 \cup CIS_2$. This leads to an increase in the system learnability and self-adjustment.

2. When the adaptation capabilities are less than the sum of the adaptation capabilities of the original systems (integration and unification into an ensemble is inexpedient or impracticable): $CIS_{int} < CIS_1 \cup CIS_2$.

In a first approximation, considering the combination of transport critical infrastructure and public health care critical infrastructure systems into an unified ensemble, the enhancement in joint adaptative capabilities of the social critical infrastructure system may be conditionally achieved. As a result, thereby, the resilience of entire critical infrastructure system can be improved. Following further the logic in a given example, this applies to all critical infrastructures (energy, cyber, safety, industrial, etc.) up to the regional critical infrastructure system as a whole.

Results and discussion

Using linguo-combinatorial modeling methodology let's give a formal representation of the critical infrastructure resilience conceptualization by transition from system resilience description in natural language to mathematical formulations, i.e., combined equations. Let the following keywords, describing the critical infrastructure resilience, in a abstract phrase:

$$\begin{aligned} \text{System Resilience} = & \text{Preventive Capacity} + \text{Absorptive Capacity} + \\ & + \text{Restorative Capacity} + \text{Adaptive Capacity}. \end{aligned} \quad (3)$$

This phrase denotes keywords and implies only their meanings. In the existing structure of natural language, meanings are not indicated. Formally, the concept of meaning can be introduced in the following form:

$$\begin{aligned} \text{System Resilience} = & \text{Preventive Capacity} * \text{Measure}_1 + \text{Absorptive Capacity} * \text{Measure}_2 + \\ & + \text{Restorative Capacity} * \text{Measure}_3 + \text{Adaptive Capacity} * \text{Measure}_4. \end{aligned} \quad (4)$$

Let's denote the keywords characterizing system resilience as C_i (C – Capabilities), and the meanings as M_i (M – Measures). Then, formulation (4) can be represented as follows:

$$\sum_{i=1}^4 C_i M_i = 0. \quad (5)$$

Formulations (4) and (5) are the prime models of phrase (3). If the system resilience is formalized in the form of rough equilibrium mathematical equation: $F(r_1, r_2, r_3, r_4, t) = 0$, which can be conditionally used for balancing resilience capacities, the form (5) is obtained by differentiating this equation. Then, C_i will be partial derivatives, and M_i will be time derivatives of the variables.

This model is an algebraic ring and equation (5) can be resolved with respect to C_i , or with respect to M_i , by introducing a third group of variables so-called arbitrary coefficients U_s :

$$\begin{cases} C_1 = U_1 M_2 + U_2 M_3 + U_3 M_4, \\ C_2 = -U_1 M_1 + U_4 M_3 + U_5 M_4, \\ C_3 = -U_2 M_1 - U_4 M_2 + U_6 M_4, \\ C_4 = -U_3 M_1 - U_5 M_2 - U_6 M_3 \end{cases} \quad (6)$$

or in a different way:

$$\begin{cases} M_1 = U_1 C_2 + U_2 C_3 + U_3 C_4, \\ M_2 = -U_1 C_1 + U_4 C_3 + U_5 C_4, \\ M_3 = -U_2 C_1 - U_4 C_2 + U_6 C_4, \\ M_4 = -U_3 C_1 - U_5 C_2 - U_6 C_3 \end{cases} \quad (7)$$

where U_1, U_2, U_3, U_4 are the arbitrary coefficients that can be used to solve various problems on the manifold (5). For example, if it is necessary to achieve a maximum in system adaptive capacity (variable $r_4 \rightarrow \max$), then the arbitrary coefficients can be assigned as follows: $U_3 = -bC_1$, $U_4 = -bC_2$, $U_5 = -bC_3$, $U_6 = -bC_4$, and, thereof, the following formulation can be written:

$$\begin{cases} \frac{dr_1}{dt} = U_1C_2 - U_2C_3 - bC_1C_4, \\ \frac{dr_2}{dt} = -U_1C_1 - bC_2C_3 - bC_3C_4 = -U_1C_1 - b(C_2C_3 + C_3C_4), \\ \frac{dr_3}{dt} = -U_2C_1 + bC_2C_2 - bC_4C_4 = -U_2C_1 + b(C_2^2 + C_4^2), \\ \frac{dr_4}{dt} = bC_1C_1 + bC_2C_3 + bC_3C_4 = b(C_1^2 + C_2C_3 + C_3C_4). \end{cases} \quad (8)$$

If $b > 0$, then the variable r_4 steadily tends to a maximum, and the arbitrary coefficients U_1 and U_2 remain for manipulation of system motion path.

In the general case, with n variables and m manifolds (restrictions), the number of arbitrary coefficients S will be equal to the number of combinations of n by $m+1$:

$$S = C_n^{m+1}, n > m. \quad (9)$$

The number of arbitrary coefficients S is a measure of system uncertainty and adaptability. It can be also used for system control under interaction with external environment and adaptation to the dynamics in these interactions. The quantification rule of the number of arbitrary coefficients is schematically shown in Table 1.

Table 1

The matrix for number determination of the arbitrary coefficients (introduced from [12])

n	m							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2	1							
3	3	1						
4	6	4	1					
5	10	10	5	1				
6	15	20	15	6	1			
7	21	35	35	21	7	1		
8	28	56	70	56	28	8	1	
9	36	84	126	126	84	36	9	1

Structural stability and the stability of system inherent relationships that ensures its integrity and identity, that is, the preservation of system basic attributes and features under influencing of various external and internal factors, is maintained by the adaptative capabilities of the elements of these systems [11]. In the proposed linguo-combinatorial model of critical infrastructures resilience, the adaptative capabilities of critical infrastructure systems are directly determined by the number of arbitrary coefficients in the structure of equivalent equations, and the optimum structural stability is achieved in the range of adaptative maximum, which is disclosed in various classes of systems with the dimension of more than six variables [10]. The more of arbitrary coefficients is, the higher the adaptative capabilities of the system are. On the other hand, the number of arbitrary coefficients depends on the number of imposed couplings. When imposing additional couplings, the number of arbitrary coefficients can either decrease or increase. In the case $n > 6$, when imposing additional restricting manifolds, the number of arbitrary coefficients will firstly grow, reach a maximum, and then go down. Therefore, the superposition of restricting manifolds can be considered as a way of adapting the system to environmental dynamics. In the limit, the number of arbitrary coefficients can be reduced to zero. In this case, it will be a critical infrastructure system with a rigid structure, which, with the slightest change in the external environment, will not be able to operate correctly. The system inability to effectively reduce mismatches in such-and-such way may be identified with system degradation when the resilience level is narrowed down. On-stream of resilience managing, system degradation results from the contradiction between the chosen modes of adaptation through self-learning or bootstrapping. Thus, the manipulations with arbitrary coefficients represent tuning or self-adjustment of the system performance to maintain the required level of resilience.

The Figure 1 schematically illustrates communication model of system interactions with the external environment. This combined control model by deviation and external disturbance shows how the system variables $X_1(t), \dots, X_k(t)$ interact with environmental variables $P_1(t), \dots, P_k(t)$, and mismatch error signals are transmitted to the system control unit. Therein, $\Delta_1(t), \dots, \Delta_k(t)$ are the deviations of variables $P_1(t), \dots, P_k(t)$ and $\Delta(t)$ is a deviation of the state variables $Y_1(t), \dots, Y_n(t)$ that determine the trajectory of dynamic system in the resilience domain at the development cycle $[0, T]$ from the given values $Y_0(t)$. $\xi(t)$ are the random nature parametric disturbances of the external environment.

In this case, the system uses two adaptation mechanisms:

- 1) tuning or self-adjustment by manipulating arbitrary coefficients in the structure of system equivalent equations (control actions $U_A(t)$ in Figure 1);
- 2) training or self-learning, which involves the imposing of new restrictions on the system variables (control actions $U_B(t)$ in Figure 1).

In addition to these adaptation mechanisms, others are possible and programmable, such as reproduction, effective forgetting, restricting communications with the external environment, etc.

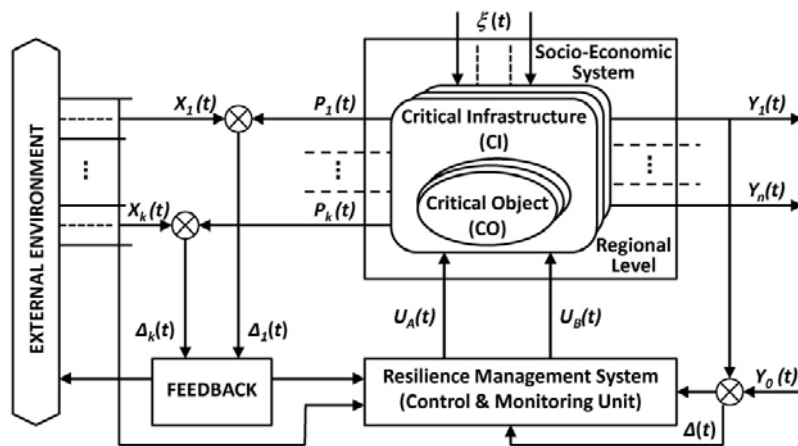


Fig. 1. The critical infrastructure resilience model based on combined control of system and external environment interactions

With regard to regional critical infrastructure systems that closely interact with a changing environment, the management goal of this type of systems is to keep them in the range of adaptive maximum: if it is necessary to maintain the resilience of the critical infrastructure, and vice versa, to remove them from the range of adaptive maximum: if the destabilization or resilience reduction of these systems is needed.

In the continuous learning and self-adjustment mode, the number of arbitrary coefficients changes in compliance with formulation (9), and this leads to the appearance of cycles in system development, which is illustrated in Figure 2, where the system development cycle starts at point 1, passes through a maximum in the number of arbitrary coefficients and ends at point 2, when transformation should occur, resetting previously imposed restrictions. Then, a new cycle begins at point 3, the system goes through maximum adaptive capabilities again, reaches the point 4, when transformation occurs again, and the system starts a new cycle at point 5, etc.

Solid line in Figure 2 shows evolutionary processes (system adaptation). The dotted line shows creative processes. The control algorithm of creative processes consists in selecting elements from a set and combining them into formulations like (4) or (5), resolving which a generating integrated system is obtained.

At point 2, several outcomes are possible: either the system will continue to evolve, or the system will move through a creative process to a new state, or will be destroyed. This model allows explaining the presence of cycles and crises in the development of complex dynamic systems. The emergence of crises (points 2, 4, 6, etc.) is the immanent attribute of these systems. It is only possible to influence the depth of crisis situations by launching the creative processes as early as possible.

The discussed model of complex dynamic systems self-organization implements the pattern of an adaptive maximum existence in the life cycle of these systems under flow of variables. The system resilience life cycle corresponds a set of crisis management phases (in [13, 14], there are: risk assessment, prevention,

preparedness, warning, response, recovery, mitigation, learning) through which the system reaches maturity and becomes capable of operating effectively in recent conditions and challenges, and moving to a new performance quality.

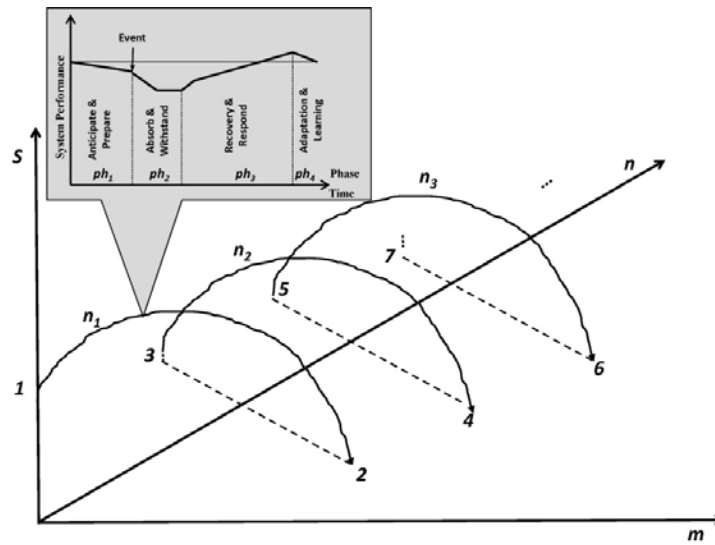


Fig. 2. Transformation of critical infrastructure system $n_1 < n_2 < \dots < n_k$ (adopted from [11]). System resilience management life cycle phases: $ph_1 < ph_2 < \dots < ph_4$. Trajectory of dynamic system: 1–2–3–4–5–6–7–...

Next, a linguo-combinatorial model of the regional critical infrastructure resilience based on the reference principals and regulations that have already been established in this research field [15, 16], will be considered.

If it is considered as keywords “Anticipatability”, “Absorbability”, “Responsiveness”, “Recoverability”, “Adaptability”, “Resistibility”, “Learnability”, then in compliance with the methodology proposed above, the formulation for modeling critical infrastructure resilience in the form of conventional equation will be expressed as follows:

$$\sum_{i=1}^7 C_i M_i = 0, \quad (10)$$

and the equivalent equations will be of the following form:

$$CIR: \begin{cases} M_1 = U_1 C_2 + U_2 C_3 + U_3 C_4 + U_4 C_5 + U_5 C_6 + U_6 C_7, \\ M_2 = U_1 C_1 + U_7 C_3 + U_8 C_4 + U_9 C_5 + U_{10} C_6 + U_{11} C_7, \\ M_3 = -U_2 C_1 - U_7 C_2 + U_{12} C_4 + U_{13} C_5 + U_{14} C_6 + U_{15} C_7, \\ M_4 = -U_3 C_1 - U_8 C_2 - U_{12} C_3 + U_{16} C_5 + U_{17} C_6 + U_{18} C_7 \rightarrow opt, \\ M_5 = -U_4 C_1 - U_9 C_2 - U_{13} C_3 - U_{16} C_4 + U_{19} C_6 + U_{20} C_7, \\ M_6 = -U_5 C_1 - U_{10} C_2 - U_{14} C_3 - U_{17} C_4 - U_{19} C_5 + U_{21} C_7, \\ M_7 = -U_6 C_1 - U_{11} C_2 - U_{15} C_3 - U_{18} C_4 - U_{20} C_5 - U_{21} C_6 \end{cases} \quad (11)$$

where C_1 is the anticipation ability of critical infrastructure, which includes such system attributes as preparedness degree, reliability, detection capability, planned maintenance, prognostic and health management, joint activity cooperation plan (agreements), protectability, operability, error and disturb sensitivity, etc.; M_1 is a variation in preventive capacity; C_2 is the absorbability of critical infrastructure, which includes such system characteristics as robustness, fragility, stress rate testing, damage level, limits of disruption, deviation and negative disturbance, internal redundancy, etc.; M_2 is the dynamics of absorptive capacity; C_3 is the responsiveness of critical infrastructure, which considers such system attributes as resource deployment, degree of concordance, facilitation ability, decoupling rate, communication plan, facilities and assets loss, vulnerability, independency, situational awareness, etc.; M_3 is a change in reactive capacity; C_4 is the

recoverability of critical infrastructure, which considers such system performances as restoration index, maintainability (technological repairability), supportability, external redundancy, unplanned maintenance, recovery time, spare parts availability, resource storage capacity, modularity, segregability, decomposability, etc.; M_4 is the dynamics of restorative capacity; C_5 is the adaptability of critical infrastructure, which includes such system characteristics as self-organization ability, technological upgradability, technological transformability, integrability, interoperability, composability, reconfiguration ability, diversification coefficient, etc.; M_5 is a variation in adaptive capacity; C_6 is the resistibility of critical infrastructure, which considers such system performances as resistance/resistivity index, downtime ratio, safety margin, functionality, feasibility, autonomy, insurance, restart ability, etc.; M_6 is a change in resistive capacity; C_7 is the learnability of critical infrastructure system, which characterizes such system attributes as tuning and self-adjustment, creativity and improvisation, service level and costs, personnel availability, diagnosability, long-term/short-term reconstruction, etc.; M_7 is the dynamics of cognitive capacity; U_1, U_2, \dots, U_{21} are the arbitrary coefficients that can be used to solve various control problems on the manifold (10).

Using and resolving the formulation (11), the overall critical infrastructure resilience can be estimated and expressed in the following way:

$$CIR = CIS + \lambda \cdot (1 - CIS), \tag{12}$$

$$\lambda = \prod_{i=1}^7 M_i. \tag{13}$$

where CIR is the overall index of critical infrastructure resilience; CIS is the overall index of the critical infrastructure safety evaluated using the methodology and mathematical formulations proposed in [17-19]; λ is the efficiency of system self-preservation and self-recovery; M_i are the target measures of system resilience capacities (critical infrastructure capabilities) described above.

The number of units in the linguo-combinatorial model of a critical infrastructure may vary. In terms of simulation accuracy, the more units are assigned and involved, the better. However, at the same time, the model visibility and pictorial presentation, and consequently, its perception by decision makers become worsen. For instance, if the unit “Recoverability” is decomposed into three units “Maintainability”, “Supportability” and “Redundancy”, either the model unit “Adaptability” is segregated in units “Transformability”, “Upgradability” and “Integrability”, then the total number of system variables will increase to nine. Hence, a formulation modeling the critical infrastructure resilience will contain nine variables:

$$\sum_{i=1}^9 C_i M_i = 0. \tag{14}$$

In Figure 3 a framework of decision-making support technology in the field of resilience management of the critical infrastructures using a unified linguo-combinatorial model of regional critical infrastructure is shown.

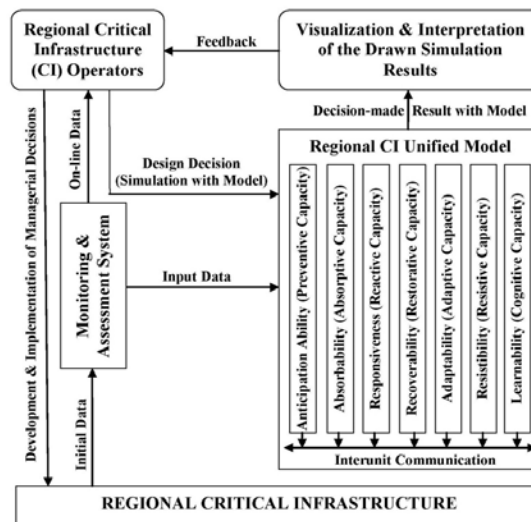


Fig. 3. Decision-making support technology in the field of resilience management of regional critical infrastructures (introduced and adopted from [12])

When modeling the resilience of critical infrastructures, it is important to consider the entire hierarchy of backbone capacities that make it up. Thereto, the decomposition principle based on the application of the seven-modular model proposed in [10, 11] can be used. In this case, the structure of units for each of the backbone capacity will be of the same type, and only the context and scope of individual units will vary. The uniformity of submodels allows for flexible synthesis and analysis of such complex dynamic systems as the critical infrastructures.

Operating situational centers in the regions possess practically all the historical data and on-line information necessary to implement and launch a linguo-combinatorial model of situational management of the critical infrastructures resilience using own or outsourced information-analytical and decision support systems. Missing control data for critical infrastructure resilience assessment and analysis can be obtained by expert judgements, public opinion polls and official statistics, if the materials are available and open-access.

The onrush of information technologies makes it possible to raise the question of mandatory preliminary modeling of the consequences of managerial decisions made in the field of ensuring the resilience of regional critical infrastructures. In perspective, this will allow identifying and avoiding many unjustified or erroneous decisions in resilience management, as well as provide the effective preventive analysis and control of the critical infrastructure facilities stability on a regional scale under adverse events and acting multiple threats. While developing by researchers and engineers all over the world system resilience models, critical infrastructure resilience modeling and estimation framework must be compatible and commensurable with the current guidelines for risk analysis and international standards for safety and security.

Conclusion

The government's and the public's perception of critical infrastructure resilience may vary in terms of the choice of regulatory mechanisms. Within a specific group of people, the perception of the level of resilience can be relatively similar. Studying the issue, personal experience and up-to-date information allow to continually improving the level of resilience. The society is able to protect itself against the risks, which it has already experienced relatively well. However, the protection against threats that have not yet occurred is essential. The advancement of science and research identifies new and new threats that were not considered in the past. The current trend of this era should be a culture of resilience in all levels ranging from personal, corporate, regional and national security to global safety. The resilience community within the globalized society will adopt new roles and activities. Thus, in the last years the focus has shifted from engineering robust critical infrastructure systems by risk management methodologies to design resilient critical infrastructure systems using resilience conceptual frameworks.

The reference point for the high-quality and effective resilience management is the ability to model, analyze and estimate it for the purpose of identifying and reducing system vulnerabilities, as well as improving the critical infrastructures based on SWOT-simulation results. The crucial step of resilience management is resilience modeling and analysis. However, there are many obstacles in front of the resilience managers and analysts to control and estimate the system resilience. Ones of these obstacles are availability of adequate models and the accessibility of precise information for resilience modeling and assessment. In addition, resilience management practice requires, on one hand, qualified safety experts and security operators and, on the other hand, skilled resilience analysts and risk managers for the purpose of critical infrastructures sustainable development and protection. Hence, the modeling and conceptualization of critical infrastructures resilience is important when attempting to evaluate and explain different resilience management strategies. A variety of resilience control models is needed to design and implementation, since it is vital for placing national security strategies in their wider socio-economic and military-political contexts, as well as for in-depth identifying the multifaceted external and inherent threats that generate emergency situations and initiate adverse events.

Linguo-combinatorial models are a new type of models of the ill-formalized systems such as most critical infrastructures, and use the mathematical apparatus of post-non-classical science. At the level of non-classical science, observers and experts occupied a central place in managing safety and stability, and at the level of post-non-classical science, the main role is already assigned to resilience managers, operators and analysts. This mathematical apparatus propagation for designing linguo-combinatorial models of this type of systems of various scale and nature, and its wide applications provided the foundation for identifying a new emergent attribute of complex systems, namely, the phenomenon of adaptative maximum. The presence of adaptative maximum phenomenon in the operating life cycle of organizational and technical systems allows explaining the manner of critical situations that periodically occur in these systems. Hence, the resilience

management strategy of the critical infrastructures implies that system resilience must be controlled in such a way as to keep it in the range of adaptive maximum under dynamically changing environment. The intensity of critical situations and crises is determined by the deviation from the range of adaptive maximum. This intensity can be significantly reduced by carrying out continuous problem monitoring of the system status and resilience characteristics, and taking appropriate anti-crisis measures. The use and availability of arbitrary coefficients, as well as the ability to extend the model provide the flexibility of model adjustment and customization for critical infrastructure resilience adequate estimation and efficient simulation.

The applicability of the linguo-combinatorial modeling of critical infrastructures resilience and the approach to situational management of the dynamics of their adaptive characteristics, have been examined. A linguo-combinatorial model for managing the critical infrastructures resilience, formalized in the form of an equivalent system of differential equations with arbitrary coefficients, has been developed. Manipulation of arbitrary coefficients provides the correction of system motion path within the bounds of resilient state space and retaining system operating characteristics in the admitted region for the purpose of performing optimal adaptive functions and balancing resilience capacities of the system. The advancement of system resilience theory, i.e., conceptual framework and formal representation, and the expanding of linguo-combinatorial modeling application domain to the class of critical infrastructure systems, has been proposed.

When managing and analyzing the resilience of critical infrastructures assisted by linguo-combinatorial modeling methodology, for each specific application case, it is necessary to verify the model, check its fitness for real system behavior and examine the convergence of control algorithm implemented in the model. Moreover, it is necessary to evaluate the mismatch errors of connecting inputs when synthesizing the resilience management structure, determine the optimal configuration of model parameters to problem-solving of system feedback stabilization in the range of adaptive capabilities and coordination of the modeled system features interaction at resilience management life cycle phases taken into consideration. Studying the matter of these issues is the subject of our further research.

References

1. Council of the European Union Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection. *Official Journal of the European Union*. 2008;L345:75–82.
2. Labaka L., Hernantes J., Sarriegi J.M. Resilience framework for Critical Infrastructures: An Empirical Study in a Nuclear Plant. *Reliability Engineering and System Safety*. 2015;141:92–105.
3. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M. et al. The Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review. *Energies*. 2021;14(6):1571–1603.
4. Sathurshan M., Saja A., Thamboo J. et al. Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review of Measurement Frameworks. *Infrastructures*. 2022;7(5):67–93.
5. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M. et al. Resilience analysis: A formulation to model risk factors on complex system resilience. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2021;(12):871–883.
6. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973;(4):1–23.
7. *Critical Infrastructure Resilience: National Infrastructure Advisory Council Final Report and Recommendations*. September 8, 2009. U.S. Department of Homeland Security. Washington, D.C., 2009:54.
8. Petersen L., Lange D., Theocharidou M. Who cares what it means? Practical reasons for using the word resilience with critical infrastructure operators. *Reliability Engineering and System Safety*. 2020;199(106872).
9. Ignat'ev M.B. *Golonomnye avtomaticheskie sistemy = Holonomic automatic systems*. Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1963:204. (In Russ.)
10. Ignatyev M. Linguo-combinatorial simulation of complex systems. *Journal of Mathematics and System Science*. 2012;2(1):58–66.
11. Ignat'ev M.B. *Prosto kibernetika = Just cybernetics*. Saint Petersburg: Strata, 2016:248. (In Russ.)
12. Masloboev A.V., Putilov V.A., Ignat'ev M.B. Linguistic-combinatorial model of regional security management. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra. Informatsionnye tekhnologii = Proceedings of the Kola Scientific Center. Information technology*. 2018;(9):9–20. (In Russ.)
13. Pursiainen C. *The Crisis Management Cycle*. UK, London: Routledge, 2017:194.
14. Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Lovecek T. Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements. *International Journal of critical infrastructure protection*. 2019;(25):125–138.
15. Masloboev A.V., Bystrov V.V. Conceptual model of critical infrastructure viability in the context of modern security theory of complex systems. *Ekonomika. Informatika = Economy. Computer science*. 2020;47(3):555–572. (In Russ.)

16. Masloboev A.V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience. *Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):115–130.
17. Severtsev N.A., Yurkov N.K. *Bezopasnost' dinamicheskikh sistem na etapakh zhiznennogo tsikla = Security of dynamic systems at the stages of life the cycle*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:568. (In Russ.)
18. Yurkov N.K., Mikhaylov V.S. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. Vvedenie i osnovnye rezul'taty = Integral estimates in reliability theory. Introduction and main results*. Moscow: Tekhnosfera, 2020:152. (In Russ.)
19. Tsygichko V.N., Chereskin D.S., Smolyan G.L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur = Safety of critical infrastructures*. Moscow: URSS, 2019:200. (In Russ.)
20. Severtsev N.A. System analysis of determining the parameters of the state and the parameters of object surveillance to ensure safety. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(1):4–10. (In Russ.)
21. Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Savochkin A.E., Semochkina I.Yu. Ensuring reliability in the life cycle of artificial intelligence systems of responsible purpose. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):12–20. (In Russ.)

Список литературы

1. Council of the European Union Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection // Official Journal of the European Union. 2008. L345. P. 75–82.
2. Labaka L., Hernantes J., Sarriegi J. M. Resilience framework for Critical Infrastructures: An Empirical Study in a Nuclear Plant // *Reliability Engineering and System Safety*. 2015. Vol. 141. P. 92–105.
3. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M. [et al.]. The Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review // *Energies*. 2021. Vol. 14, № 6. P. 1571–1603.
4. Sathurshan M., Saja A., Thamboo J. [et al.]. Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review of Measurement Frameworks // *Infrastructures*. 2022. Vol. 7, iss. 5. P. 67–93.
5. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M. [et al.]. Resilience analysis: A formulation to model risk factors on complex system resilience // *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2021. № 12. P. 871–883.
6. Holling C. S. Resilience and stability of ecological systems // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973. № 4. P. 1–23.
7. Critical Infrastructure Resilience: National Infrastructure Advisory Council Final Report and Recommendations. September 8, 2009. U.S. Department of Homeland Security. Washington, D.C., 2009. 54 p.
8. Petersen L., Lange D., Theocharidou M. Who cares what it means? Practical reasons for using the word resilience with critical infrastructure operators // *Reliability Engineering and System Safety*. 2020. Vol. 199. Article no. 106872.
9. Игнатъев М. Б. Голономные автоматические системы. М.-Л. : АН СССР, 1963. 204 с.
10. Ignatyev M. Linguo-combinatorial simulation of complex systems // *Journal of Mathematics and System Science*. 2012. Vol. 2, № 1. P. 58–66.
11. Игнатъев М. Б. Просто кибернетика. СПб. : Страта, 2016. 248 с.
12. Маслобоев А. В., Путилов В. А., Игнатъев М. Б. Лингво-комбинаторная модель управления региональной безопасностью // *Труды Кольского научного центра. Информационные технологии*. 2018. Вып. 9. С. 9–20.
13. Pursiainen C. *The Crisis Management Cycle*. UK, London : Routledge, 2017. 194 p.
14. Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Lovecek T. Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements // *International Journal of critical infrastructure protection*. 2019. № 25. P. 125–138.
15. Маслобоев А. В., Быстров В. В. Концептуальная модель жизнеспособности критических инфраструктур в контексте современной теории безопасности сложных систем // *Экономика. Информатика*. 2020. Т. 47, № 3. С. 555–572.
16. Masloboev A. V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience // *Reliability and quality of complex systems*. 2020. № 4. P. 115–130.
17. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 568 с.
18. Юрков Н. К., Михайлов В. С. Интегральные оценки в теории надежности. введение и основные результаты. М. : Техносфера, 2020. 152 с.
19. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С., Смолян Г. Л. Безопасность критических инфраструктур. М. : УРСС, 2019. 200 с.
20. Северцев Н. А. Системный анализ определения параметров состояния и параметры наблюдения объекта для обеспечения безопасности // *Надежность и качество сложных систем*. 2013. № 1. С. 4–10.
21. 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.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник лаборатории
информационных технологий управления
промышленно-природными системами,
Институт информатики и математического
моделирования имени В. А. Путилова
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»;
главный научный сотрудник лаборатории
природоподобных технологий
и техносферной безопасности Арктики,
Центр наноматериаловедения
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»
(Россия, 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 tech-
nologies for industrial-natural system management,
Putilov Institute for Informatics
and Mathematical Modeling
of the Federal Research Centre "Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences";
chief researcher of the laboratory of nature-inspired
technologies and environmental safety of the Arctic,
Nanomaterials Research Centre
of the Federal Research Centre "Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences"
(14 Fersmana street, Apatity, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 08.09.2023

Поступила после рецензирования / Revised 15.09.2023

Принята к публикации / Accepted 08.10.2023

УПРАВЛЕНИЕ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ АГРАРНО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Е. А. Воронин¹, А. Г. Семкин²

¹ Федеральное исследовательское учреждение «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, Россия

² Федеральное научное учреждение аграрной экономики и социального развития сельских территорий –
Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

¹ e.voronin1@gmail.com, ² a.semkin@vniiesh.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются 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 методологии. *Материалы и методы.* Приводятся методы и технологии применения машинного обучения в задачах обеспечения и управления продовольственной безопасностью, основанные на данных из информационного пространства цифровой экономики. Предлагаются методология и методы оценки и прогнозирования угроз, оценки уязвимости продовольственных связанных с ними экономических систем и выбора оптимальной стратегии противодействия им. *Результаты и выводы.* Выбраны алгоритмы и наиболее подходящие языки программирования для реализации решений поставленной задачи. Отмечается, что все это возможно только при наличии информационного пространства, организованного в соответствии с парадигмой цифровой экономики.

Ключевые слова: экономика, безопасность, продовольственная безопасность, вероятность, управление, машинное обучение

Для цитирования: Воронин Е. А., Семкин А. Г. Управление продовольственной безопасностью методами машинного обучения в информационном пространстве аграрно-промышленного комплекса // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 179–188. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-17

FOOD SECURITY MANAGEMENT BY MACHINE LEARNING METHODS IN THE INFORMATION SPACE OF THE AGRICULTURAL AND INDUSTRIAL COMPLEX

E.A. Voronin¹, A.G. Semkin²

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

² Federal Research Center for Agrarian Economics and Social Development of Rural Territories –
All-Russian Research Institute of Agricultural Economics, Moscow, Russia

¹ e.voronin1@gmail.com, ² a.semkin@vniiesh.ru

Abstract. *Background.* The paper considers a refined statement of the problem of food security management in the formation of a digital economy, developed on the basis of a probabilistic assessment of the implementation of organizational, organizational, resource, technical and technological processes for ensuring food security using a universal methodology. *Materials and methods.* Methods and technologies for applying machine learning in the tasks of ensuring and managing food security based on data from the information space of the digital economy are given. A methodology and methods are proposed for assessing and forecasting threats, assessing the vulnerability of economic systems and choosing the optimal strategy to counter them. *Results and conclusions.* Algorithms and the most suitable programming languages for the implementation of the solutions of the set task have been selected. It is noted that all this is possible only if there is an information space organized in accordance with the paradigm of the digital economy.

Keywords: economics, security, food security, probability, control, machine learning

For citation: Voronin E.A., Semkin A.G. Food security management by machine learning methods in the information space of the agricultural and industrial complex. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):179–188. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-17

Введение

Продовольственная безопасность – это элемент национальной безопасности государства [1, 2]. Ситуация, при которой все люди в каждый момент времени имеют физический и экономический доступ к достаточной в количественном отношении безопасной пище, необходимой для ведения активной и здоровой жизни.

Указом Президента РФ от 21.01.2020 № 20 принята Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации, в которой сформулированы основные положения по ее реализации, к ним можно отнести [3]:

- она является инструментом стратегического планирования и прогнозирования основных направлений государственной социальной политики в области формирования продовольственной безопасности;

- в ней сформулированы конкретные цели и задачи в сфере продовольственной безопасности и независимости, связанные в первую очередь с повышением качественных индикаторов жизнедеятельности граждан России и обеспечением их качественными агропродовольственными товарами, на основе устойчивого развития сельскохозяйственной цифровой экономики;

- определены показатели функционирования продовольственной безопасности и критерии их оценки на основании требований мировых стандартов, используя при этом результаты экономической и физической доступности сельскохозяйственного сырья и продовольствия;

- при формировании продовольственной безопасности и независимости необходимо учитывать риски и угрозы, связанные в первую очередь с санкционной войной США и ряда отдельных мировых стран, их союзников, а также ухудшением внутренней и внешней экономической конъюнктуры, высокой инфляционной составляющей, кризисом в финансово-банковской области, снижением инвестиционных потоков в аграрную сферу, слабым технико-технологическим развитием, наличием климатических и агроэкономических угроз и т.д.;

- сформулированы направления развития государственной аграрной политики в сфере обеспечения продовольственной безопасности и независимости с обоснованием основных критериев, связанных с улучшением экономической и физической доступности качественных экологически чистых продуктов питания, формированием полноценного госрезерва продовольствия, увеличением урожайности сельхоз культур и продуктивности животных, восстановлением и повышением плодородия почвы, мерами, направленными на обеспечение биологической безопасности, созданием новых современных технологий в сфере производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, развитием научно-технического потенциала;

- механизм обеспечения продовольственной безопасности и независимости России устанавливается в соответствии с нормативно-правовыми актами, определяющим условием является эффективное функционирование экономики страны за счет модернизации отраслей агропромышленного комплекса и повышения уровня господдержки аграрного бизнеса.

Обеспечение продовольственной безопасности государства, отрасли, региона, муниципального образования или поселения представляет собой комплексную задачу управления, постановка и решение которой должны рассматриваться одновременно по следующим аспектам:

- организационный в части анализа, оценки и оптимизации процессов взаимодействия органов управления, должностных лиц и специалистов, отвечающих за регламентацию их деятельности (без учета применения средств управления) при планировании и реализации управленческой деятельности в области продовольственной безопасности;

- организационно-ресурсный, рассматриваемый с учетом обеспечения реализации организационных процессов необходимыми информационными, когнитивными, техническими и другими ресурсами;

- технико-технологический в части анализа, оценки и оптимизации взаимодействия средств управления, задействованных при обеспечении процессов управления в ходе планирования и решения задач продовольственной безопасности.

С точки зрения системного подхода к решению подобной задачи в условиях глобализации и интенсивной конкуренции на уровне стран, территорий и поселений необходимо отметить, что ее сложность обусловлена существующими ограничениями такого подхода, связанными с неполной определенностью в отношении направлений развития основных структурных компонентов цифровой экономики и прежде всего единого информационного пространства, создаваемого в ее интересах, полноты обеспечения органов управления продовольственной безопасностью необходимыми ресурсами и

в части других обстоятельств [1–3]. В связи с этим она относится к многоуровневым задачам системного анализа, информационных технологий Data Science и Big Data с большим объемом информации и вычислений.

Обычно данная задача решается как статическая и оценочная задача. Состояние безопасности рассматривается без учета динамики экономических и связанных с ними других процессов и при этом проблема продовольственной безопасности разрабатывается не в полной мере. Ее необходимо расширять с учетом перехода к расширенной проблеме активного управления безопасностью по нескольким аспектам. При этом необходимо решить задачи математической формализации управляемых процессов и их обеспечения необходимой информацией. Поэтому в руководствах по управлению безопасностью она сводится к разработке организационных мероприятий [3–5].

Однако цифровизация экономики и необходимость создания единого цифрового информационного пространства представляют новые перспективы и возможности ее решения с использованием информационных технологий хранения и обработки больших массивов данных, искусственного интеллекта и машинного обучения [6, 7].

Технологии машинного обучения получили широкое распространение в обеспечении информационной безопасности при выявлении аномалий и угроз в процессах обработки, передачи и хранения информации. Прямой перенос таких технологий на задачи управления продовольственной безопасностью невозможен вследствие большого различия управляемых процессов как по качеству, содержанию, так и по характеру, но идеология и методология машинного обучения являются единственным и основным базисом решения проблемы эффективного управления продовольственной безопасностью [8].

Уточненная постановка задачи комплексного управления состоянием продовольственной безопасности

Формулировка задачи: провести анализ возможности и условий применения технологий машинного обучения в процессах управления продовольственной безопасностью в системе цифровой экономики.

В соответствии с требованиями и типовой схемой постановки задачи управления применительно к поставленной задаче необходимо:

- определить наблюдаемый или вычисляемый параметр состояния и функцию отклика управляемой системы;
- установить параметры, управляющие состоянием системы;
- выбрать и обосновать критерий качества управления;
- разработать алгоритм управления, удовлетворяющий критерию качества управления.

Определение безопасности [wiki], «**Безопасность** – это состояние объекта, в котором он либо не подвергается негативному воздействию, либо успешно противостоит такому воздействию, продолжая нормально функционировать», наиболее привлекательно и полно, так как оно отражает свойства окружающей среды и самой системы, которая функционирует в этой среде. В этом определении представляется возможность использования единого нормируемого показателя и теории его использования, изложенной в работах [2, 8]:

$$P_s = (1 - P_u) + P_u \cdot P_o, \quad (1)$$

где P_s – вероятность безопасного состояния или безопасность системы в заданный момент времени; P_u – вероятность угрозы безопасному состоянию в заданный момент времени; P_o – вероятность успешного отражения или противодействия угрозе в заданный момент времени средствами обеспечения безопасности.

Вероятностный подход к оценке продовольственной безопасности, построенный на его основе, алгебра безопасности могут быть математической методологией оценки продовольственной безопасности систем со сложной структурой и схемой угроз.

Для случая n -го количества угроз, когда каждая из них может привести к продовольственным потерям, продовольственная безопасность P_s оценивается по формуле

$$P_s = \prod_{i=1}^n P_{si} = \prod_{i=1}^n [(1 - P_{ui}) + P_{ui} \cdot P_{oi}], \quad (2)$$

где P_{ui} – вероятность i -й угрозы; P_{oi} – вероятность успешного противодействия i -й угрозе.

Управляющим параметром, отражающим свойство системы безопасности противостоять угрозам, как это следует из формулы (1), является P_o – вероятность успешного противодействия угрозе.

Главные преимущества критерия продовольственной безопасности, определенного на основе такого вероятностного показателя, состоят в том, что он является нормируемым, пригодным для сложной схемы событий, имеет однозначное, функциональное объяснение, отражает опасность угроз и возможности противодействия им соответствующими средствами. При этом представляется возможность оценки продовольственной безопасности по двум основным направлениям [3, 4]:

- оценки продовольственной безопасности с учетом реализации организационных, организационных, ресурсных и технологических процессов обеспечения продовольственной безопасности;
- выбор наиболее эффективного направления реализации организационных, организационно-ресурсных и технико-технологических процессов и обоснованно подходить к разработке мер по обеспечению продовольственной безопасности.

Методика решения задачи комплексного управления состоянием продовольственной безопасности

Продовольственную безопасность принято оценивать по безопасному состоянию продовольственной корзины [2].

Если корзина продовольствия местного населения содержит n -продуктов и каждый продукт подвергается риску по поставкам, то продовольственная безопасность региона или поселения вычисляется по формуле

$$P_s = \prod_i [(1 - p(v_i)) + p(v_i)q(v_i)], \quad (3)$$

где $p(v_i)$ – вероятность угрозы i -му продукту; $q(v_i)$ – вероятность успешного противодействия i -й угрозе или замещение его внутренним производством.

Известно, что качество управления продовольственной безопасностью определяется ожидаемыми потерями от ее нарушения и затратами на противодействие угрозам. Очевидно, для каждого вида продовольствия существует некоторое минимальное, равновесное состояние их суммы, дающее оптимальное значение безопасности

$$\text{opt}(P_s) \rightarrow \min(U_i + Z_i), \quad (4)$$

где U_i – потери от реализованных угроз при заданном уровне безопасности; Z_i – затраты на обеспечение заданного уровня безопасности.

Ущерб от реализованных угроз вычисляются по формуле

$$U_i = P_{u,i} \cdot (1 - P_{o,i}) \cdot d_i, \quad (5)$$

где d_i – возможные экономические потери от угроз.

Если все мероприятия обеспечения i -го вида продовольственной безопасности обозначить как $x_{i,j}$, принять их как категориальные переменные и объединить в набор или множество управляющих мероприятий $\{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3} \dots x_{iN}\}$, а N – их число, то можно определить и записать $P_{oi}(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3} \dots x_{iN})$ как многомерную функцию N – категориальных, управляющих переменных.

$Z_{oi} = Z(P_{oi}, \{x_i, c_{x_i}, i = 1 \dots N_i\})$ – функция от вероятностей успешного противодействия угроз P_{oi} и затрат на мероприятия по ее обеспечению.

Исходя из этих определений, алгоритм расчета оптимального уровня безопасности строится на базе следующего выражения:

$$\text{opt}(P_s) \rightarrow \arg \min_{\{x_{ij}, i=1 \dots N_i, j=1 \dots K\}} \sum_{i=1}^N [d_i \cdot P_{ui} (1 - P_{oi}(x_i, i = 1 \dots N_i))] + \sum_{j=1}^{K_{ii}} z_{ij}, \quad (6)$$

где z_i – аддитивная функция категориальных переменных, вычисляемая как скалярное произведение вектора мероприятий на вектор их стоимости

$$z_i = \sum_{j=1}^{N_i} c_{ij} x_{ij}, \quad (7)$$

где c_{ij} – затраты на x_{ij} -е мероприятие по обеспечению безопасности.

Эта задача оптимизации продовольственной безопасности может решаться несколькими способами в зависимости от экономических условий обеспечения безопасности:

- 1) комплексно, по всей продовольственной корзине с учетом расходов по всей корзине продовольствия;
- 2) отдельно по каждому виду продовольствия и независимо от расходов на обеспечение другими видами продовольствия.

В первом случае математический алгоритм оптимизации будет иметь вид

$$\text{opt}(P_s) \rightarrow \arg \min_{\{x_j, i=1 \dots N_i, j=1 \dots K_j\}} \sum_{i=1}^N [d_i \cdot P_{ui} (1 - P_{oi}(x_i, i=1 \dots N_i)) + \sum_{j=1}^{K_{ii}} z_{ij}, j=1 \dots K_{ij}],$$

при условии

$$\sum_i c_i \leq Z, \quad (8)$$

где Z – общие затраты на обеспечение продовольственной безопасности.

Во втором случае, формально, алгоритм оптимизации будет иметь вид

$$\text{opt}(P_{si}) \rightarrow \arg \min_{\{x_j, j=1 \dots K_j\}} [d_i \cdot P_{ui} (1 - P_{oi}) + \sum_{j=1}^{K_{ij}} z_{ij}, j=1 \dots K_{ij}]$$

при условии

$$\sum_{j=1}^{N_i} c_{ij} x_{ij} \leq z_i, \quad (9)$$

где z_i – предельные затраты на обеспечение продовольственной безопасности по i -му продукту.

Полученный из условий (6), (8), (9) вектор набора мероприятий $\{x_{ij}, i=1 \dots N, j=1 \dots K_i\}$ однозначно определяет успешность обеспечения безопасности при функции вероятности $P_{oi}(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3} \dots x_{iN})$ и при этом порождает задачу нахождения и оценки значения этой функции вероятности.

Исходя из того, что оптимальное управление осуществляется в виде вектора $X = \{x_i, i=1 \dots N\}$ с компонентами категориального типа, поиск его компонент возможен только с помощью эвристических или эволюционных алгоритмов оптимизации таких как алгоритм отжига или генетического отбора [11–14] или классического алгоритма динамического программирования [19].

Известно, что вероятность успешного противодействия угрозам зависит от состояния защищаемой системы и от мероприятий по противодействию угрозам. Ее принято представлять как показатель безопасности в научной и учебной литературе [6–8]. Для ее вычисления принято применять функционально-ресурсный подход с использованием производственной функции или индикаторный метод, с оценкой отклонений от их нормативных значений, но они не подходят для принятого критерия продовольственной безопасности.

В случае вероятностного критерия безопасности наиболее адекватным будет использование логистической регрессии. Она позволяет получать непосредственно оценку вероятности успешного противодействия угрозам. Это, как известно, один из широко распространенных методов машинного обучения, применяемых при обеспечении информационной безопасности [10].

Успешность противодействия угрозам определяется набором существующих угроз, качественным состоянием защищаемой системы и набором средств противодействию угрозам.

Оценка вероятности успешного противодействия угрозам методом машинного обучения с логистической регрессией определяется по вектору угроз $\{u_i, i=1 \dots N_u\}$, вектору фазовых показателей функционального состояния системы $\{y_j, j=1 \dots N_y\}$ и вектору мероприятий противодействия угрозам

$\{x_k, k = 1 \dots N_k\}$, где N_u – число угроз; N_y – число фазовых состояний; N_k – число возможных мероприятий по противодействию угрозам.

На них строится расширенное пространство реализации логистической регрессии

$$V = \{v_l, l = 1 \dots N_v\}, \quad (10)$$

$$v_l = \{u_1, u_2, \dots, u_{N_u}, y_1, y_2, \dots, y_{N_y}, x_1, x_2, \dots, x_{N_x}\},$$

где $N_v = N_u + N_y + N_x$.

Каждому значению расширенного вектора ставится соответствующее значение бинарной переменной s , отражающее успешность противодействия угрозе.

По определению, численное значение функции логистической регрессии соответствует вероятности успешного противодействия угрозам и вычисляется по формуле

$$P_o(V) = \frac{1}{1 + e^{-Q}}, \quad (11)$$

$$Q = \theta^T V = \theta_1 v_1 + \theta_2 v_2 + \theta_3 v_3 + \dots + \theta_{N_v} v_{N_v}, \quad (12)$$

где θ^T – транспонированный вектор весовых коэффициентов регрессии; V – вектор расширенного пространства регрессии.

Машинное обучение методом подбора параметров логистической регрессии заключается в подборе компонент вектора коэффициентов регрессии по обучающей выборке методом максимального правдоподобия

$$\theta^T = \arg \max_{\theta} \prod_{i=1}^{N_o} P_o\{s = s^{(i)} | v = v^{(i)}\}, \quad (13)$$

где $P_o(s | v) = P_o(\theta^T V)^s \cdot (1 - P_o(\theta^T V))^{1-s}$ – распределение Бернулли от $P_o(Q_i)$, $s \in \{0, 1\}$, $s = 0$ – безуспешное отражение угрозы, $s = 1$ – успешное отражение угрозы.

Ожидаемое значение вероятности угрозы $P_o(V)$ вычисляется путем подстановки векторов θ и V в формулы (8), (9).

На практике обучающая выборка или набор значений $\{s^{(i)}, v^{(i)}, i = 1 \dots N_v\}$ заполняется по результатам реальных наблюдений и/или имитационного моделирования методом Монте-Карло [15,16].

Алгоритмы этого метода машинного обучения хорошо изучены и представлены в соответствующих учебниках и руководствах. Существуют их реализации на языках программирования Python, Julia и Scala в виде модулей специальных библиотек [16–18].

Для эффективного управления продовольственной безопасностью необходимо не только реагировать на текущие угрозы, но и прогнозировать будущие и на основании прогноза принимать меры превентивного характера. Это позволит значительно снизить затраты, ущербы и повысить эффективность или успешность защиты от угроз и воздействий.

Угрозы можно разделить на внешние и внутренние, на явные и скрытые. Явные внешние угрозы не поддаются управлению и их можно только прогнозировать. Прогнозируются они методами автокорреляции, регрессионного анализа, или марковских процессов. В регрессионном и автокорреляционном анализе прогнозируется абсолютное значение внешних, представляющих угрозу. Марковские цепи удобно использовать для категориальных переменных, характеризующих угрозы, и вычислять их вероятность [19, 20].

Выбор метода прогнозирования зависит от вида наблюдаемых параметров и реального назначения защищаемой системы. Регрессионный и корреляционный анализ хорошо известны и представлены в научной и учебной литературе, но при вероятностной модели безопасности они мало пригодны.

В рамках предлагаемого вероятностного подхода к управлению безопасностью необходимо применять методы теории случайных процессов. Дискретные марковские процессы и марковские цепи будут более удобными и эффективными. Они позволяют моделировать и прогнозировать искомые вероятности угроз $P_u(n)$ и могут представлять сложные схемы угрожающих событий. В реализации численными методами они просты и наглядны в математическом и прикладном смысле [19, 20].

Эти методы оперативной оценки и прогнозирования угроз продовольственной безопасности по результатам статистических наблюдений на основе марковских процессов с дискретным и непрерывным временем подробно изучены как часть этого направления исследований, разработаны и представлены в работе [9].

Вероятности скрытых внешних угроз вычисляются по наблюдаемым аномалиям состояния внешней среды. Эта задача называется выявлением аномалий внешней среды и широко применяется в управлении информационной безопасностью. Она решается методами машинного обучения и вероятностного программирования. При этом вероятностные модели строятся на сочетании байесовских сетей и марковских цепей [22, 23].

При такой схеме обработки информации на вход байесовской сети подаются значения наблюдаемых параметров внешней среды, а на выходе получаются вероятности категориальных переменных, характеризующих внешние угрозы. Для прогнозирования угроз эти состояния категориальных переменных сопрягаются с марковской цепью, которая выдает прогноз на вероятности возможных угроз.

Внутренние угрозы прогнозируются функционально-ресурсным методом в сочетании с логистической регрессией путем выявления аномалий состояния и вычисления их вероятностной. Для этого строится обучающая выборка с одним или несколькими индикаторами угроз и индикаторами фазового состояния. В условиях цифровизации экономики и цифрового информационного пространства формирование обучающей выборки не представляет проблем.

Используя однозначную или множественную логистическую регрессию, вычисляют вероятности внутренних угроз.

Значения внешних и внутренних угроз выявляются и обрабатываются системой управления безопасностью, представленной на рис. 1.

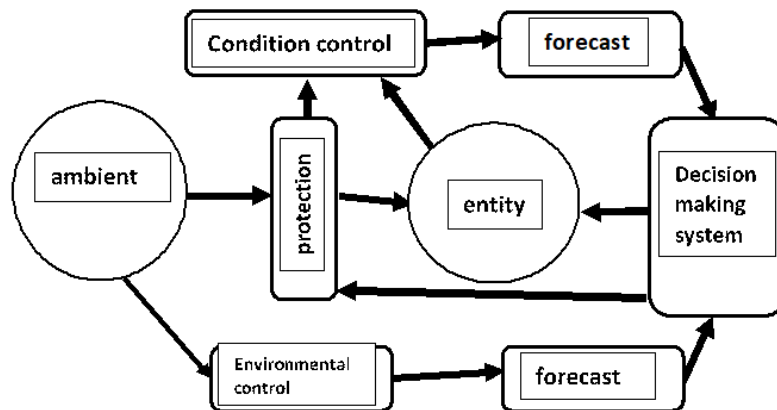


Рис. 1. Структура и компоненты системы управления безопасностью

Она состоит из следующих функциональных блоков:

- блок мониторинга внешней среды, выявления аномалий и угроз безопасности защищаемого объекта;
- блок прогнозирования внешних угроз;
- блок контроля состояния, выявления внутренних аномалий и внутренних угроз;
- блок прогнозирования внутренних угроз;
- блок принятия выбора управляющих воздействий по обеспечению безопасности;
- блок защиты от внешних угроз.

Система управления работает следующим образом. Средствами контроля внешней среды выявляются текущие и прогнозируемые угрозы внешней среды. Средствами контроля внутреннего состояния выявляются текущие и последующие угрозы.

Вероятности прогнозируемых угроз вычисляются как вероятности состояний марковской цепи.

Информация о внутренних и внешних угрозах поступает на блок принятия решений по выбору защитных мер обеспечения безопасности по изложенным алгоритмам, который находит оптимальное значение и набор мероприятий по обеспечению безопасности.

Вероятность успешного противодействия угрозам $P_o(V) = P_o(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ вычисляется с помощью логистической регрессии.

Программная реализация представляемой системы для задачи управления продовольственной безопасностью реализуется на языке Python с использованием известных библиотек Scikit-learn и TensorFlow [16–18].

Заключение

1. Создание цифровой экономики требует своевременного и адекватного решения проблем ее защиты от угроз и прогнозируемых опасностей, что определяет актуальность приведения в соответствие новым задачам методической основы обеспечения продовольственной безопасности.

2. Предлагаемый комплексный подход к управлению продовольственной безопасностью на основе вероятностной оценки реализации организационных, организационно-ресурсных и технико-технологических процессов обеспечения безопасности позволяет использовать как комплексный критерий оценки уровня реализации указанных процессов, так и его декомпозицию по ним, что позволяет определять чувствительность обобщенного показателя продовольственной безопасности по отношению к компонентам указанных процессов, а также определять приоритетность разработки необходимых мер по обеспечению продовольственной безопасности с учетом выявления угроз и прогнозируемых опасностей.

3. Вероятностный критерий продовольственной безопасности позволяет математически формализовать и решить задачу оптимального управления продовольственной безопасностью.

4. Принцип минимума суммарных затрат является необходимым и достаточным критерием оптимального управления продовольственной безопасностью.

5. Математической и алгоритмической основой формулирования и решения задачи оптимального управления продовольственной безопасностью могут быть марковские цепи и логистическая регрессия с использованием вероятностного программирования и машинного обучения.

6. Для реализации системы управления безопасностью необходимым и достаточным будет использование языка программирования Python с библиотеками Scikit-learn и TensorFlow, а высоконагруженных и распределенных корпоративных или отраслевых систем будет Scala.

Список литературы

1. Экономическая безопасность России. Общий курс : учебник / под ред. В. К. Сенчагова. 2-е изд. М. : Дело, 2005.
2. Воронин Е. А. Оценка и выбор систем безопасности обеспечения продовольствием // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 124–128
3. Семкин А. Г., Воронин Е. А. Пространственное развитие специализированных высокотехнологичных зон на основе универсального показателя формирования продовольственной безопасности // Устойчивое развитие села, цифровизация и экономика АПК : материалы Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава. СПб., 2023. С. 53–62.
4. Семкин А. Г., Воронин Е. А. Продовольственная безопасность как фактор стратегического пространственного развития отдельных специализированных, высокотехнологичных зон (территорий) в России // Экономика сельского хозяйства России. 2023. № 2. С. 2–10.
5. Иванова Т. Л. Теоретические подходы к управлению экономической безопасностью промышленного предприятия // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2017. № 1. С. 118–127.
6. Воронин Е. А., Юшин И. В. Актуальные проблемы обеспечения экономической безопасности в сфере цифровой экономики // Научное обозрение. Сер. 1, Экономика и право. 2020. № 1-2. doi: 10.26653/2076-4650-2020-1-2-13
7. Воронин Е. А., Юшин И. В., Сафронова Ю. В. Основные подходы к решению задач по обеспечению экономической безопасности в информационном пространстве цифровой экономики // Экономика и предпринимательство. 2020. Т. 116, № 3. С. 984–987.
8. Воронин Е. А., Нгуен К. Т. Выбор и обоснование критерия оценки и нормирования безопасности мероприятий и систем различного назначения // Научные технологии. 2018. Т. 19, № 4. С. 17–19.
9. Воронин Е. А. Оперативная оценка и прогнозирование угроз продовольственной безопасности на основе ограниченного набора статистических данных // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 2. С. 104–107.
10. Чжоу К., Фримэн Д. Машинное обучение и безопасность / пер. с англ. А. В. Снастина. М. : ДМК Пресс, 2020. 388 с.
11. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации / пер. с англ. А. В. Логунова. М. : ДМК Пресс, 2020. 1002 с.
12. Вирсански Э. Генетические алгоритмы на Python / пер. с англ. А. А. Слинкина. М. : ДМК Пресс, 2020. 286 с.

13. Омеляненко Я. Эволюционные нейросети на языке Python / пер. с англ. В. С. Яценкова. М. : ДМК Пресс, 2020. 310 с.
14. Скобцов Ю. А., Сперанский Д. В. Эволюционные вычисления. М. : Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2014.
15. Воронин Е. А., Юшин И. В. Оценка экономической безопасности и успешности противодействия экономическим угрозам методами машинного обучения // Экономика и межнациональная культура. 2020. № 4. С. 43–50.
16. Грас Дж. Data Science. Наука о данных с нуля / пер. с англ. СПб. : БХВ-Петербург, 2017. 336 с.
17. Жерон О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем / пер. с англ. СПб. : Альфа-книга, 2018. 688 с.
18. Рашка С., Мирджалили В. Python и машинное обучение: машинное и глубокое обучение с использованием Python, Scikit-learn и TensorFlow 2 : пер. с англ. 3-е изд. СПб. : Диалектика, 2020. 848 с.
19. Ховард Р. А. Динамическое программирование и марковские процессы. М. : Сов. радио, 1964. 190 с.
20. Сукар Л. Э. Вероятностные, графовые модели. Принципы и приложения / пер. с англ. А. В. Снастина. М. : ДМК Пресс, 2021. 338 с.
21. Воронин Е. А. Юшин И. В. Прогнозирование угроз и выбор оптимальной стратегии обеспечения экономической безопасности методами машинного обучения // Научное обозрение. Сер. 1, Экономика и право. 2019. № 6. С. 115–123.
22. Кэмерон Д.-П. Вероятностное программирование на Python: байесовский вывод и алгоритмы. СПб. : Питер, 2019. 256 с.
23. Пфедфер А. Вероятностное программирование на практике / пер. с англ. А. А. Слинкин. М. : ДМК Пресс, 2017. 462 с.
24. Воронин Е. А., Дарьина А. Н., Дивеев А. И. [и др.]. У истоков теории надежности сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 3–4.
25. Воронин Е. А. Оценка и выбор систем безопасности обеспечения продовольствием // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 124–128.

References

1. Senchagov V.K. (ed.). *Ekonomicheskaya bezopasnost' Rossii. Obshchiy kurs: uchebnik. 2-e izd. = Economic security of Russia. General course : textbook. 2nd ed.* Moscow: Delo, 2005. (In Russ.)
2. Voronin E.A. Assessment and choice of food security systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(2):124–128. (In Russ.)
3. Semkin A.G., Voronin E.A. Spatial development of specialized high-tech zones on the basis of a universal indicator of food security formation. *Ustoychivoe razvitie sela, tsifrovizatsiya i ekonomika APK: materialy Vseros. (natsional'noy) nauch.-prakt. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava = Sustainable rural development, digitalization and the economy of agriculture : materials of All Russia. (national) scientific and Practical conference of the teaching staff.* Saint Petersburg, 2023:53–62. (In Russ.)
4. Semkin A.G., Voronin E.A. Food security as a factor of strategic spatial development of certain specialized, high-tech zones (territories) in Russia. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii = The economics of agriculture in Russia.* 2023;(2):2–10. (In Russ.)
5. Ivanova T.L. Theoretical approaches to managing the economic security of an industrial enterprise. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya = Innovative economy: prospects for development and improvement.* 2017;(1):118–127. (In Russ.)
6. Voronin E.A., Yushin I.V. Actual problems of ensuring economic security in the field of digital economy. *Nauchnoe obozrenie. Ser. 1, Ekonomika i pravo = Scientific review. Ser. 1, Economics and law.* 2020;(1-2). (In Russ.). doi: 10.26653/2076-4650-2020-1-2-13
7. Voronin E.A., Yushin I.V., Safronova Yu.V. Basic approaches to solving problems of ensuring economic security in the information space of the digital economy. *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Economics and entrepreneurship.* 2020;116;(3):984–987. (In Russ.)
8. Voronin E.A., Nguen K.T. The choice and justification of criteria for evaluating and rationalizing the safety of measures and systems for various purposes. *Naukoemkie tekhnologii = High-tech technologies.* 2018;19(4):17–19. (In Russ.)
9. Voronin E.A. Operational assessment and forecasting of threats to food security based on a limited set of statistical data. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2022;2:104–107. (In Russ.)
10. Chio K., Frimen D. *Mashinnoe obuchenie i bezopasnost' = Machine learning and security.* Transl. from Eng. by A.V. Snastina. Moscow: DMK Press, 2020:388. (In Russ.)
11. Saymon D. *Algoritmy evolyutsionnoy optimizatsii = Algorithms of evolutionary optimization.* Transl. from Eng. by A.V. Logunova. Moscow: DMK Press, 2020:1002. (In Russ.)
12. Virsanski E. *Geneticheskie algoritmy na Python = Genetic algorithms in Python.* Transl. from Eng. by A.A. Slinkina. Moscow: DMK Press, 2020:286. (In Russ.)

13. Omel'yanenko Ya. *Evolyutsionnye neyroseti na yazyke Python = Evolutionary neural networks in Python*. Transl. from Eng. by V.S. Yatsenkova. Moscow: DMK Press, 2020:310. (In Russ.)
14. Skobtsov Yu.A., Speranskiy D.V. *Evolyutsionnye vychisleniya = Evolutionary calculations*. Moscow: Natsional'nyy otkrytyy universitet «INTUIT», 2014. (In Russ.)
15. Voronin E.A., Yushin I.V. Assessment of economic security and the success of countering economic threats using machine learning methods. *Ekonomika i mezhnatsional'naya kul'tura = Economics and international culture*. 2020;(4):43–50. (In Russ.)
16. Gras Dzh. *Data Science. Nauka o dannyykh s nulya = Data Science. Data Science from scratch*. Transl. from Eng. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2017:336. (In Russ.)
17. Zheron O. *Prikladnoe mashinnoe buchenie s pomoshch'yu Scikit-Learn i TensorFlow: kontseptsii, instrumenty i tekhniki dlya sozdaniya intellektual'nykh sistem = Applied machine learning using Scikit-Learn and TensorFlow: concepts, tools and techniques for creating intelligent systems*. Transl. from Eng. Saint Petersburg: Al'fa-kniga, 2018:688. (In Russ.)
18. Rashka S., Mirdzhalili V. *Python i mashinnoe obuchenie: mashinnoe i glubokoe obuchenie s ispol'zovaniem Python, Scikit-learn i TensorFlow 2: per. s angl. 3-e izd. = Python and machine learning: machine and deep learning using Python, Scikit-learn and TensorFlow 2: trans. from English. 3rd ed*. Saint Petersburg: Dialektika, 2020:848. (In Russ.)
19. Khovard R.A. *Dinamicheskoe programmirovaniye i markovskie protsessy = Dynamic programming and Markov processes*. Moscow: Sov. radio, 1964:190. (In Russ.)
20. Sukar L.E. *Veroyatnostnye, grafovye modeli. Printsipy i prilozheniya = Probabilistic, graph models. Principles and applications*. Transl. from Eng. by A.V. Snastina. Moscow: DMK Press, 2021:338. (In Russ.)
21. Voronin E.A., Yushin I.V. Forecasting threats and choosing the optimal strategy for ensuring economic security using machine learning methods. *Nauchnoye obozreniye. Ser. 1, Ekonomika i parvo = Scientific Review. Series 1, Economics and Law*. 2019;(6):115–123. (In Russ.)
22. Kameron D.-P. *Veroyatnostnoye programmirovaniye na Python: bayesovskiy vyvod i algoritmy = Probabilistic programming in Python: Bayesian inference and algorithms*. Saint Petersburg: Piter, 2019:256. (In Russ.)
23. Pfeffer A. *Veroyatnostnoye programmirovaniye na praktike = Probabilistic programming in practice*. Transl. from Eng. by A.A. Slinkin. Moscow: DMK Press, 2017:462. (In Russ.)
24. Voronin E.A., Dar'ina A.N., Diveev A.I. et al. At the origins of the theory of reliability of complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(1):3–4. (In Russ.)
25. Voronin E.A. Assessment and choice of food security systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):124–128. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Алексеевич Воронин

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, пр-кт 60-летия Октября, 9)
E-mail: e.voronin1@gmail.com

Evgeny A. Voronin

Doctor of technical sciences, professor,
leading researcher,
Federal Research Center "Computer Science
and Control" of the Russian Academy of Sciences
(9 60-letiya Oktyabrya avenue, Moscow, Russia)

Александр Григорьевич Семкин

доктор экономических наук,
заведующий отделом систем управления,
интеграции и кооперации в АПК,
Федеральный научный центр аграрной экономики
и социального развития сельских территорий –
Всероссийский научно-исследовательский
институт экономики сельского хозяйства
(Россия, г. Москва, Хорошевское шоссе, 35)
E-mail a.semkin@vniiesh.ru

Aleksandr G. Semkin

Doctor of economical sciences, head of the department
of management systems, integration and cooperation in
the agro-industrial complex,
Federal Scientific Center for Agrarian Economics
and Social Development of Rural Territories –
All-Russian Research Institute of Agricultural
Economics
(35 Khoroshevskoe highway, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 04.09.2023

Поступила после рецензирования / Revised 14.09.2023

Принята к публикации / Accepted 25.09.2023