



№1-2025

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Алгоритмы обработки информации
- Анализ данных и моделирование
- Вычислительные и информационно-управляющие системы
- Нанотехнологии, электроника и радиотехника

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

*Федеральная служба по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи
и охраны культурного наследия*

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс ПС704

№ 1 (243). 2025 г.

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Редакционный совет

Курейчик В.В. (гл. редактор); Кравченко Ю.А. (зам. гл. редактора); Бородянский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Боженюк А.В.; Борисов В.В.; Веселов Г.Е.; Гайдук А.Р.; Горбанёва О.И.; Еремеев А.П.; Зинченко Л.А.; Каляев И.А.; Касьянов А.О.; Коноплев Б.Г.; Коробейников А.Г.; Куповых Г.В.; Левин И.И.; Массель Л.В.; Медведев М.Ю.; Мельник Э.В.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Сергеев Н.Е.; Середин Б.М.; Сидоркина И.Г.; Стемповский А.Л.; Сухинов А.И.; Турулин И.И.; Тютиков В.В.; Угольницкий Г.А.; Целых А.Н.; Юханов Ю.В.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственные за выпуск: Клевцов С.И., Самойлов А.Н.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 14.03. 2025 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 26,1. Уч.-изд. л. – 17,9.

Заказ № . Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

Адрес редакции: 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, ЮФУ, тел. +7 (928) 909-57-82, e-mail: iborodyanskiy@sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, М.А. Ганжур, М.И. Бесхмельнов БИОИНСПИРИРОВАННЫЙ ПОИСК В ПОЛНОМ ГРАФЕ СОВЕРШЕННОГО ПАРОСОЧЕТАНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ	6
Д.А. Береза, Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова РАЗРАБОТКА АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ.....	22
В.П. Федосов, Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад, С.В. Кучерявенко АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КАНАЛЕ 3D WIMAX НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ SIMO-OFDM	37
С.И. Родзин, А.И. Дерменжи ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЙ В ПОПУЛЯЦИОННЫХ АЛГОРИТМАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МЕТРОПОЛИСА–ГАСТИНГСА	45
А.В. Полтавский, Д.С. Поляниченко, Е.Р. Коломенская, М.А. Бутакова АЛГОРИТМЫ ГЕНЕРАЦИИ И ОБРАБОТКИ SEM-ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СВОЙСТВ БИОНЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТРИЦ И МЕТОДЫ ИХ ВЕРИФИКАЦИИ.....	56
С. Сингх, А.В. Прибыльский, Е.Ю. Косенко РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ.....	65
Д.Ю. Зорькин, Л.В. Самофалова, Н.В. Асанова МУРАВЬИНЫЙ АЛГОРИТМ НА RUTHON	81
А.В. Козловский РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СОСТАВНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	92

РАЗДЕЛ II. АНАЛИЗ ДАННЫХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Н.К. Полуянович, О.В. Качелаев, М.Н. Дубяго ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ И ОЦЕНКА ЕЕ РОБАСТНОСТИ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С АДДИТИВНЫМИ ПРОФИЛЯМИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	104
А.Н. Целых, И.А. Валухов, Л.А. Целых ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ КОРТЕЖЕЙ ИЗ ТЕКСТА НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....	118
М.С. Анферова, А.М. Белевцев, В.В. Дворецкий МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ.....	130
А.А. Богнюков, Д.Ю. Зорькин, И.А. Тарасова МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИИ: СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	138
С.Л. Беляков, Л.А. Израилев ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ОБОБЩЕНИЯМИ	153
А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВЕДЕННЫХ ТОКОВ МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ	164
А.Н. Бакуменко, В.Т. Лобач ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАЛОВЫСОТНОГО МЕТОДА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	175

РАЗДЕЛ III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Д.А. Гриценко, И.Б. Аббасов ОБЗОР ТЕНДЕНЦИЙ В РАЗРАБОТКЕ БИОМИМЕТИЧЕСКИХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ	185
А.Л. Охотников ИНТЕГРИРОВАННАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАНСПОРТОМ	203
Н.А. Жукова, И.А. Куликов УПРАВЛЕНИЕ В АВТОНОМНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ПОМОЩЬЮ ОНТОЛОГИИ НАМЕРЕНИЙ	214
О.В. Шиндор, П.А. Кокунин, А.А. Егорчев, Л.Н. Сафина, Я.С. Мурин АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА КЛАССА МИКРО.....	226

РАЗДЕЛ IV. НАНОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

В.А. Обуховец, Н.В. Самбуров СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО СОГЛАСОВАНИЯ ДИПОЛЬНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ.....	237
А.В. Андрианов, А.Н. Зикий, А.С. Кочубей СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СМЕСИ СИГНАЛА И ШУМА НА ВЫХОДЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО ПРИЁМНИКА.....	247
Во Ба Ау, Ю.В. Юханов НИЗКОПРОФИЛЬНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ	255
Д.И. Бакшун, С.П. Тарасов, И.И. Турулин МЕТОДИКА РЕАЛИЗАЦИИ НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ УПРАВЛЯЕМОГО РЕКУРСИВНОГО ФИЛЬТРА С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ НА ПРИМЕРЕ АППРОКСИМАЦИИ ОКНА ХАННА	263
В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, А.Ю. Головин, Д.С. Мироненко МАЛОГАБАРИТНЫЙ СВАРОЧНЫЙ ИНВЕРТОР ДЛЯ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ	270
А.Е. Колоденкова, С.С. Верещагина РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ОБНАРУЖЕНИЮ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.....	279
В.А. Воронкин, Е.М. Баян, В.В. Петров ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ, НА ИХ МОРФОЛОГИЮ	288

CONTENT

SECTION I. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, M.A. Ganzhur, M.I. Beskhmelnov BIOINSPIRED SEARCH IN THE COMPLETE GRAPH OF A PERFECT MATCH OF MAXIMUM POWER	6
D.A. Bereza, L.A. Gladkov, N.V. Gladkova DEVELOPMENT OF AN AGENT-BASED ALGORITHM FOR SOLVING SYSTEMS OF LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS OF LARGE DIMENSION	23
V.P. Fedosov, AL-Musawi Wisam Mohammedtaqi M. Jawad, S.V. Kucheryavenko ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING SPATIAL-TEMPORAL SIGNALS FOR DATA TRANSMISSION IN 3D WIMAX CHANNEL BASED ON SIMO-OFDM PRINCIPLES	37
S.I. Rodzin, A.I. Dermenzhi INITIALIZATION OF SOLUTIONS IN POPULATION METAHEURISTICS BASED ON THE METROPOLIS–HASTINGS METHOD	46
A.V. Poltavskiy, D.S. Polyanichenko, E.R. Kolomenskaya, M.A. Butakova ALGORITHMS OF GENERATION AND SEM-IMAGES PROCESSING FOR PROPERTIES IDENTIFICATION OF BIOINORGANIC MATRICES AND METHODS OF THEIR VERIFICATION.....	57
S. Singh, A.V. Pribylskiy, E.Y. Kosenko DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ALGORITHMS FOR FORECASTING FIRE HAZARDOUS SITUATIONS	66
D.Y. Zorkin, L.V. Samofalova, N.V. Asanova PYTHON ANT ALGORITHM.....	82
A.V. Kozlovskiy PARALLELIZATION OF INFORMATION PROCESSING IN THE FORMATION OF COMPOSITE IMAGES	92

SECTION II. DATA ANALYSIS AND MODELING

N.K. Poluyanovich, O.V. Kachelaev, M.N. Dubyago BUILDING A MODEL AND EVALUATING ITS ROBUSTNESS IN THE TASK FORECASTING FOR CONSUMERS WITH ADDITIVE TECHNOLOGIES ELECTRICITY CONSUMPTION PROFILES	104
A.N. Tselykh, I.A. Valukhov, L.A. Tselykh APPLYING DEEP LEARNING TO EXTRACT CAUSALITY FROM TEXT USING SYNTHETIC DATA.....	119
M.S. Anferova, A.M. Belevtsev, V.V. Dvoreckij METHODOLOGY FOR DETERMINING AND ANALYZING THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF TECHNOLOGICAL TRENDS	130
A.A. Bognyukov, D.Yu. Zorkin, I.A. Tarasova HIERARCHY ANALYSIS METHOD: A SYSTEMATIC APPROACH TO DECISION MAKING UNDER UNCERTAINTY	138
S.L. Belyakov, L.A. Izrailev GEOINFORMATION MODELS OF EMERGENCY SITUATIONS WITH SPATIAL GENERALIZATIONS	153
A.A. Yakovlev, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy SIMULATION OF LIGHTNING STRIKE INDUCED CURRENTS AT MISSILERY SAMPLES TESTING	164
A.N. Bakumenko, V.T. Lobach SIMULATION MODEL OF LOW-ALTITUDE METHOD OF PROFILING A REFLECTIVE SURFACE	176

SECTION III. COMPUTING AND INFORMATION-CONTROL SYSTEMS

D.A. Gritsenko, I.B. Abbasov A REVIEW OF TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF BIOMIMETIC UNDER WATER VEHICLES	185
A.L. Okhotnikov INTEGRATED INTELLIGENT UNMANNED VEHICLE CONTROL SYSTEM.....	204
N.A. Zhukova, I.A. Kulikov CONTROL IN AUTONOMOUS TELECOMMUNICATION SYSTEMS USING INTENT ONTOLOGY	214
O.V. Shindor, P.A. Kokunin, A.A. Egorchev, L.N. Safina, Ya.S. Murin HARDWARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A REMOTELY OPERATED UNMANNED UNDERWATER VEHICLE OF THE MICRO-CLASS	227

SECTION IV. NANOTECHNOLOGY, ELECTRONICS AND RADIO ENGINEERING

V.A. Obukhovets, N.V. Samburov SYNTHESIS OF THE DESIGN OF BROADBAND MATCHING OF A DIPOLE RADIATOR	237
A.V. Andrianov, A.N. Zikiy, A.S. Kochubey CHARACTERISTICS OF THE SIGNAL AND NOISE MIXTURE AT THE OUTPUT OF A LOGARITHMIC RECEIVER	248
Vo Ba Au, Y.V. Yukhanov LOW-PROFILE ANTENNA ARRAY FOR A BASE STATION	256
D.I. Bakshun, S.P. Tarasov, I.I. Turulin METHODOLOGY OF REALIZATION ON PLIS OF A CONTROLLED RECURSIVE FILTER WITH A FINITE IMPULSE RESPONSE IN THE FORM OF AN APPROXIMATION OF THE HANN WINDOW	263
V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, A.Y. Golovin, D.S. Mironenko SMALL-SIZED WELDING INVERTER FOR SEMI-AUTOMATIC WELDING WITH HIGH FREQUENCY AC CURRENT	270
A.E. Kolodenkova, S.S. Vereshchagina DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED APPROACH TO ELECTRICAL EQUIPMENT FAULT DETECTION USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS.....	279
V.A. Voronkin, V.V. Petrov, E.M. Bayan THE INFLUENCE OF SYNTHESIS CONDITIONS ON THE MORPHOLOGY OF ZnO NANORODS, OBTAINED BY CHEMICAL BATH DEPOSITION METHOD.....	288

Раздел I. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-6-22

Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, М.А. Ганжур, М.И. Бесхмельнов

БИОИНСПИРИРОВАННЫЙ ПОИСК В ПОЛНОМ ГРАФЕ СОВЕРШЕННОГО ПАРОСОЧЕТАНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

Разработана реконфигурируемая архитектура гибридной многоагентной системы поиска решений, базирующиеся на парадигмах роевых алгоритмов. Реконфигурируемая архитектура путем настройки позволяет реализовать следующие методы гибридизации: высокоуровневую и низкоуровневую гибридизацию вложением, типа препроцессор/постпроцессор, ко-алгоритмическую на базе одного или нескольких типов алгоритмов. Предложена методология синтеза совершенного паросочетания минимального веса в полном графе, основанная на базовых принципах гибридизации поисковых, эволюционных процедур. В работе агентами роя являются трансформирующиеся хромосомы, являющиеся генотипами решения. В качестве кода решения используется упорядоченный список множества вершин графа. Разработана структура упорядоченного кода паросочетания, главное достоинство которого заключается в том, что одному решению (паросочетанию) соответствует один код и наоборот. Определены свойства упорядоченного кода и разработаны алгоритмы кодирования и декодирования. Работа гибридной системы начинается с генерации роем пчел случайным образом произвольного множества отличающихся друг от друга решений в виде исходного множества хромосом. Ключевой операцией пчелиного алгоритма является исследование перспективных решений и их окрестностей в пространстве поиска. Разработан метод формирования окрестностей решений с регулируемой степенью подобия и близости между ними. На последующих этапах работы многоагентной системы выполняется поиск решений процедурами, построенными на основе гибридизации роевого и муравьиного алгоритмов. Отличительной особенностью гибридизации является сохранение автономии гибридизируемых алгоритмов. Отметим, что для представления решений в алгоритмах используется единая структура данных, что упрощает стыковку разработанных процедур. Предлагается подход к построению модифицированной парадигмы роя трансформирующихся хромосом. Поиск решений выполняется в аффинном пространстве. В процессе поиска осуществляется перманентные трансформации (переход) хромосом в состояния с лучшим значением целевой функции решения (градиентная стратегия). Процесс поиска решений итерационный. На каждой итерации осуществляется трансформация (переход) хромосом в состояния с лучшими значениями целевой функции решения. Целью трансформации хромосомы, тяготеющей к лучшей хромосоме, в новое состояние является минимизация степени различия, путем изменения взаимного расположения элементов в упорядоченном списке, что соответствует увеличению веса аффинной связи. Обновленные после трансформации хромосомы являются, в свою очередь, базовыми точками в последующих трансформациях. В результате экспериментов было установлено, что показатели качества разработанных алгоритмов имеют более высокие значения чем в работах, представленных в литературе.

Поисковая оптимизация; методология; декомпозиция; роевой интеллект; муравьиная и пчелиная колонии; трансформирующиеся хромосомы; адаптивное поведение; гибридизация.

B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, M.A. Ganzhur, M.I. Beskhmel'nov

BIOINSPIRED SEARCH IN THE COMPLETE GRAPH OF A PERFECT MATCH OF MAXIMUM POWER

A reconfigurable architecture of a hybrid multi-agent decision-making system based on swarm algorithm paradigms has been developed. The reconfigurable architecture allows implementing the following hybridization methods by tuning: high-level and low-level hybridization by nesting, preprocessor/postprocessor type, co-algorithmic based on one or several types of algorithms. A methodology for

synthesizing a perfect matching of minimum weight in a complete graph based on the basic principles of hybridization of search. evolutionary procedures has been proposed. In this paper, the swarm agents are transforming chromosomes, which are the genotypes of the solution. An ordered list of the set of graph vertices is used as the solution code. A structure of an ordered matching code has been developed, the main advantage of which is that one solution (matching) corresponds to one code and vice versa. The properties of the ordered code have been determined and encoding and decoding algorithms have been developed. The hybrid system operation starts with the random generation by a swarm of bees of an arbitrary set of solutions differing from each other in the form of an initial set of chromosomes. The key operation of the bee algorithm is the study of promising solutions and their neighborhoods in the search space. A method for forming neighborhoods of solutions with an adjustable degree of similarity and closeness between them has been developed. At subsequent stages of the multi-agent system operation, solutions are searched for by procedures built on the basis of hybridization of the swarm and ant algorithms. A distinctive feature of hybridization is the preservation of the autonomy of the hybridized algorithms. Note that a single data structure is used to represent solutions in the algorithms, which simplifies the docking of the developed procedures. An approach to constructing a modified paradigm of a swarm of transforming chromosomes is proposed. The search for solutions is performed in an affine space. In the process of searching, permanent transformations (transitions) of chromosomes into states with the best value of the objective function of the solution (gradient strategy) are carried out. The process of finding solutions is iterative. At each iteration, the chromosomes are transformed (transitioned) into states with better values of the objective function of the solution. The purpose of transforming a chromosome that tends to be the best chromosome into a new state is to minimize the degree of difference by changing the mutual arrangement of elements in an ordered list, which corresponds to an increase in the weight of the affine connection. The chromosomes updated after the transformation are, in turn, the base points in subsequent transformations. As a result of the experiments, it was found that the quality indicators of the developed algorithms have higher values than in the works presented in the literature.

Search engine optimization, methodology; decomposition; swarm intelligence; ant and bee colonies; transforming chromosomes; adaptive behavior; hybridization.

Введение. Среди комбинаторно-логических задач на графах важное место занимает проблема определения паросочетаний. Паросочетанием графа $G=(X,U)$ называется подмножество таких рёбер $Q \subset U$, что любые два ребра $u_k, u_l \in Q$ не имеют общих вершин, т.е. не смежны [1]. Паросочетание максимальной мощности определяется как паросочетание, включающее максимальное число рёбер [2]. Алгоритмы решения данной задачи применяются при проектировании инженерных сетей, коммуникаций, построения систем поддержки принятия решений в неопределённых условиях, проектировании СБИС и т.п. Задачи такого типа относятся к переборным задачам с экспоненциальной временной сложностью. В этой связи необходимо разрабатывать различные эвристики для построения алгоритмов с полиномиальной временной сложностью [3]. Группу «жадных» (градиентных) алгоритмов, составляют алгоритмы, действующие по принципу «максимальный выигрыш на каждом шаге» [4]. В группу наиболее эффективных и широко распространенных алгоритмов для построения максимального паросочетания входят: алгоритм Куна [5], алгоритм Хопкрофта-Карпа [3], алгоритм Радо-Эдмонса [6], алгоритм Форда-Фалкерсона [7], построенный по схеме поиска в глубину. Существуют алгоритмы определения паросочетаний в графе, основанные на использовании потоков в сетях [8], эволюционного моделирования [9], генетического поиска [10] и других эвристик, которые обеспечивают приемлемые результаты при решении задач малой и средней сложности. Часто эта процедура используется в итерационных адаптивных структурах [11]. Это предъявляет повышенные требования к качеству и времени решения задачи нахождения максимального паросочетания. Возникшие потребности в решении задач большой и очень большой размерности является побудительным мотивом исследований и разработок новых эффективных алгоритмов. Анализ литературы показывает, что наиболее успешными в этих условиях являются математические методы, в которых заложены принципы природных механизмов принятия решений [12].

К таким методам можно отнести, прежде всего, методы адаптивного поведения [13], метод эволюционного моделирования [14], гибридные модели [15, 16], алгоритмы роевого интеллекта [17] и муравьиные алгоритмы [18]. Анализ методов решения сложных

прикладных задач показывает, что применение любого одного алгоритма оптимизации (как классического, так и популяционного) далеко не всегда приводит к успеху [19]. Для повышения эффективности поведенческих методов глобальной оптимизации в настоящее время используют два основных подхода – гибридизация и метаоптимизация. Интеграция метаэвристик популяционных алгоритмов обеспечивает более широкий обзор пространства поиска и более высокую вероятность локализации глобального экстремума задачи. Разработка общей структуры гибридных алгоритмов требует решение следующих задач: выбор гибридизируемых алгоритмов; определение общей структуры поискового процесса; вычленение функций в каждом гибридизируемом алгоритме, которые должны выполняться в составе гибридного поискового алгоритма; разработка методов трансформации данных при сращивании гибридизируемых алгоритмов. Исследования ряда авторов показали, что использование гибридизации повышает эффективность поисковых алгоритмов оптимизации в среднем на 3-5% [12]. Связующим звеном гибридизации является структура данных, описывающая интерпретации решений проблемно-ориентированных задач. Разработка принципов синтеза пространства поиска решений, позволяет строить эффективные поисковые процедуры. В работе излагается методика решения задачи нахождения максимального паросочетания в графе, основанная на моделировании адаптивного поведения биологических систем [18].

Постановка задачи нахождения паросочетания в графе. Пусть задан полный граф $G=(X, U)$, где $X=\{x_i | i=1, 2, \dots, n\}$ – множество вершин, а $U=\{u_k | k=1, 2, \dots, n_{\text{ш}}\}$ – множество ребер $u_k=(x_i, x_j)$. Каждое ребро $u_k=(x_i, x_j)$ связывает пару вершин.

Для каждой вершины x_i задается вес ψ_i . Вес вершин задается множеством $\Psi=\{\psi_i | i=1, 2, \dots, n\}$, а вес ребер – множеством $\Phi=\{\phi_k | k=1, 2, \dots, m\}$.

Вес ϕ_k ребра $u_k=(x_i, x_j)$ графа G , связывающего вершины x_i и x_j , определяется как сумма весов вершин x_i и x_j : $\phi_k=(\psi_i + \psi_j)$.

В качестве пространства поиска решений служит полный граф $G=(X, U)$.

Паросочетание Q в G – это множество попарно несмежных ребер, т.е. ребер, не имеющих общих вершин.

Основное свойство паросочетания Q в графе $G=(X, U)$ заключается в том, что любые два ребра $u_i \in Q$ и $u_j \in Q$ не имеют общих вершин, т.е. не смежны. Совершенным паросочетанием (или 1-фактором) называется паросочетание, в котором участвуют все вершины графа. То есть любая вершина графа инцидентна ровно одному ребру [3].

Обозначим как F суммарный вес ребер, входящих в паросочетание Q графа G .

Критерий оптимизации – суммарная стоимость ребер, входящих в совершенное паросочетание Q графа G . Цель оптимизации минимизация критерия:

$$F=\sum_k \phi_k (k|u_k \in Q) \rightarrow \min.$$

Методика и структура представления паросочетания в виде упорядоченной последовательности. Во многих приложениях используется кодированное представление решения: в терминах генетического алгоритма в виде хромосом, которые являются кодами решений. В качестве простейшей структуры данных, несущей информацию о решении, используется упорядоченный список (УС), задающий порядок декодирования. Решение представляется в виде кода, являющегося генотипом решения. Переход от кода к решению производится с помощью декодера. Декодер – оператор, позволяющий перейти от кода решения задачи (генотипа) к фенотипу. Фактически код решения (в том числе список) является интерпретацией решения в конкретной предметной области [7].

Пусть на полном графе $G=(X, U)$, $|X|=n$ с помощью какого-либо алгоритма построено решение – совершенное паросочетание, которое представляется в виде упорядоченного множества ребер $Q=<u_t | t=1, \dots, n_q>$, $u_t=(x_i, x_j)$. Если n – четное число, то мощность совершенного паросочетания полного графа равна $n/2$. Пусть $Q=<u_1, u_2, u_3, u_4>$, $u_1=<x_4, x_2>$, $u_2=<x_7, x_1>$, $u_3=<x_6, x_5>$, $u_4=<x_3, x_8>$. Фактически вектор Q является чередующейся цепью в графе G – простой путь в котором ребра поочередно принадлежат/не принадлежат паросочетанию, а начальная и конечная вершины не принадлежат паросочетанию.

Вектор Q после замены u_i на (x_i, x_j) преобразуется в вектор $R = \langle r_l | l=1, \dots, n_q \rangle$ в котором элементы расположены по парам таким образом, что элементы пары $u_k = (x_i, x_j)$ расположены в позициях $P = \langle p_i | i=1, 2, \dots, n \rangle$ списка R : x_i в позиции $p_i = (2k-1)$ и x_j в позиции $p_j = 2k$. p_i – это позиция вершины x_i в векторе R .

Вектор $R = \langle x_4, x_2, x_7, x_1, x_6, x_5, x_3, x_8 \rangle$ – код решение задачи паросочетания. $P = \langle p_i | i=1, 2, \dots, n \rangle$; $p_1=4$; $p_2=2$; $p_3=7$; $p_4=1$; $p_5=6$; $p_6=5$; $p_7=3$; $p_8=8$.

В работе в качестве кода решения R используется упорядоченный список множества вершин графа G , расположенных в позициях $P = \langle p_i | i=1, 2, \dots, n \rangle$ вектора R , соответствующий чередующейся цепи.

Кодом решения является соответствие между множеством вершин $X = \langle x_i | i=1, 2, \dots, n \rangle = \langle x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n \rangle$ и множеством позиций $P = \langle p_i | i=1, 2, \dots, n \rangle$ вектора R . p_i – позиция вектора R , в которой расположена вершина x_i . Декодирование паросочетания производится путем последовательного просмотра кода решения (вектора R).

Отметим, что полученный в результате декодирования порядок, в котором сформировано множество ребер, входящих в состав паросочетания, а также порядок, в котором пара вершин (x_i, x_j) , инцидентных ребру u_k , расположена в векторе R , не изменяет сущности решения. Число паросочетаний в графе известно как индекс Хосойи [1]. Вычисление этого числа является NP – задачей [1].

Недостаток этого подхода заключается в том, что перестановка в векторе R любой пары вершин, инцидентных ребру, и перестановка последовательности ребер в списке паросочетания Q не изменяет решения – паросочетания, что приводит к увеличению пространства поиска и к повышенным затратам при поиске решения.

Пусть имеется некоторое решение задачи построения совершенного паросочетания Q в полном графе $G=(X, U)$, $|X|=n$. $|Q|=n/2$. Поскольку порядок сформированных $(n/2)$ ребер, и порядок, в котором вершины размещены в парах, не имеет значения, то одному коду решения будет соответствовать число списков P , равное $(n/2)! \cdot 2 \cdot n/2 = (n/2)! \cdot n$. В связи с этим при поиске решения актуальна проблема синтеза и просмотра только одного списка, соответствующего одному конкретному решению (одному коду).

Например: решение $u_1 = \langle x_7, x_1 \rangle$, $u_2 = \langle x_3, x_8 \rangle$, $u_3 = \langle x_4, x_2 \rangle$, $u_4 = \langle x_6, x_5 \rangle$, полученное в результате декодирования чередующейся цепи (списка) $R_2 = \langle x_7, x_1, x_3, x_8, x_4, x_2, x_6, x_5 \rangle$, и решение $u_1 = \langle x_6, x_5 \rangle$, $u_2 = \langle x_3, x_8 \rangle$, $u_3 = \langle x_7, x_1 \rangle$, $u_4 = \langle x_4, x_2 \rangle$, полученное в результате декодирования $R_3 = \langle x_6, x_5, x_3, x_8, x_7, x_1, x_4, x_2 \rangle$, эквивалентны решению, полученному при декодировании списка R_1 . В приведенном примере одному решению соответствует 3 списка.

Рассмотрим на примерах переход от неупорядоченного списка к упорядоченному путем двух трансформаций.

1. $R_1 = \langle x_4, x_2, x_7, x_1, x_6, x_5, x_3, x_8 \rangle$.
 $u_1 = \langle x_4, x_2 \rangle$, $u_2 = \langle x_7, x_1 \rangle$, $u_3 = \langle x_6, x_5 \rangle$, $u_4 = \langle x_3, x_8 \rangle$.
 $u_1 = \langle x_2, x_4 \rangle$, $u_2 = \langle x_1, x_7 \rangle$, $u_3 = \langle x_5, x_6 \rangle$, $u_4 = \langle x_3, x_8 \rangle$.
 $u_1 = \langle x_1, x_7 \rangle$, $u_2 = \langle x_2, x_4 \rangle$, $u_3 = \langle x_3, x_8 \rangle$, $u_4 = \langle x_5, x_6 \rangle$.
 $R_1^* = \langle x_1, x_7, x_2, x_4, x_3, x_8, x_5, x_6 \rangle$.
2. $R_2 = \langle x_7, x_1, x_3, x_8, x_4, x_2, x_6, x_5 \rangle$.
 $u_1 = \langle x_7, x_1 \rangle$, $u_2 = \langle x_3, x_8 \rangle$, $u_3 = \langle x_4, x_2 \rangle$, $u_4 = \langle x_6, x_5 \rangle$.
 $u_1 = \langle x_1, x_7 \rangle$, $u_2 = \langle x_3, x_8 \rangle$, $u_3 = \langle x_2, x_4 \rangle$, $u_4 = \langle x_5, x_6 \rangle$.
 $u_1 = \langle x_1, x_7 \rangle$, $u_2 = \langle x_2, x_4 \rangle$, $u_3 = \langle x_3, x_8 \rangle$, $u_4 = \langle x_5, x_6 \rangle$.
 $R_2^* = \langle x_1, x_7, x_2, x_4, x_3, x_8, x_5, x_6 \rangle$.
3. $R_3 = \langle x_6, x_5, x_3, x_8, x_7, x_1, x_4, x_2 \rangle$.
 $u_1 = \langle x_6, x_5 \rangle$, $u_2 = \langle x_3, x_8 \rangle$, $u_3 = \langle x_7, x_1 \rangle$, $u_4 = \langle x_4, x_2 \rangle$.
 $u_1 = \langle x_5, x_6 \rangle$, $u_2 = \langle x_3, x_8 \rangle$, $u_3 = \langle x_1, x_7 \rangle$, $u_4 = \langle x_2, x_4 \rangle$.
 $u_1 = \langle x_1, x_7 \rangle$, $u_2 = \langle x_2, x_4 \rangle$, $u_3 = \langle x_3, x_8 \rangle$, $u_4 = \langle x_5, x_6 \rangle$.
 $R_3^* = \langle x_1, x_7, x_2, x_4, x_3, x_8, x_5, x_6 \rangle$.

После первой трансформации упорядочиваются элементы в каждой паре: значение первого элемента пары больше значения второго элемента пары.

После второй трансформации последовательность пар упорядочивается по возрастанию значений первых элементов пар.

Как видно из примеров три неупорядоченных списка $R_1 = \langle x_4, x_2, x_7, x_1, x_6, x_5, x_3, x_8 \rangle$, $R_2 = \langle x_7, x_1, x_3, x_8, x_4, x_2, x_6, x_5 \rangle$, $R_3 = \langle x_6, x_5, x_3, x_8, x_7, x_1, x_4, x_2 \rangle$ эквивалентны одному упорядоченному списку $R = \langle x_1, x_7, x_2, x_4, x_3, x_8, x_5, x_6 \rangle$, являющемуся кодом.

И наоборот коду $R = \langle x_1, x_7, x_2, x_4, x_3, x_8, x_5, x_6 \rangle$ соответствует решение:

$$R = \langle x_1, x_7, x_2, x_4, x_3, x_8, x_5, x_6 \rangle. u_1 = \langle x_1, x_7 \rangle, u_2 = \langle x_2, x_4 \rangle, u_3 = \langle x_3, x_8 \rangle, u_4 = \langle x_5, x_6 \rangle.$$

В работе предложена структура упорядоченного кода (УК) паросочетания главное достоинство которого заключается в том, что одному решению (паросочетанию) соответствует один код и наоборот.

В качестве генотипа решения (паросочетания) служит упорядоченный список R в котором расположены вершины x_i исходного множества $X = \langle x_i | i = 1, 2, \dots, n \rangle = \langle x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n \rangle$.

Упорядоченный список R обладает следующими свойствами:

- ♦ элементы списка R – вершины графа G располагающиеся в позициях списка R от 1 до n , где n четное число, равно числу вершин полного графа $G = (X, U)$;
- ♦ список R формируется в виде упорядоченной последовательности $n/2$ пар вершин (x_i, x_j) таких, что $i < j$. Каждая пара (x_i, x_j) соответствует ребру u_k , входящему в паросочетание;
- ♦ вершины пары $u_k = (x_i, x_j)$ расположены в соседних позициях списка R : x_i в позиции $p_i = (2k-1)$ и x_j в позиции $p_j = 2k$. $p_j = p_i + 1$;
- ♦ для любых двух пар $u_k = (x_i, x_j)$ и $u_l = (x_m, x_n)$ последовательности R , если $l > k$, то номер позиции p_m , в которой находится x_m , больше номера позиции p_i , в которой находится x_i , $p_m > p_i$;
- ♦ первым элементом списка R всегда является x_1 ;
- ♦ в составе любой пары (x_i, x_j) элемент x_n не может быть первым.

Процедура формирования кода произвольного паросочетания в виде упорядоченного списка вершин. Построение упорядоченного списка, обладающего выше перечисленными свойствами, выполняется по шагам на базе опорного упорядоченного вектора $V = \langle x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rangle$ вершин графа $G = (X, U)$, $|X| = n$ с динамически изменяемым составом. Начальный состав вектора V включает все вершины от x_1 до x_n . Отметим, что, если число вершин n четное, то число ребер, входящих в совершенное паросочетание полного графа равно $n/2$. Если число вершин n нечетное, то в состав графа $G = (X, U)$ включается вершина с нулевой локальной степенью.

На каждом шаге t процесса формирования кода в обновленном составе вектора $V(t)$ выбирается очередная пара $u_t = (x_i, x_j)$ вершин для включения в упорядоченную последовательность (УП) R . На шаге t процесс выбора очередной пары ребра $u_t \in U$ включает две стадии. На первой стадии выбирается первый элемент очередной пары, на второй стадии выбирается второй элемент пары. После выбора двух элементов очередной пары они удаляются из опорного упорядоченного вектора $V(t)$.

Выбор ребра $u_t \in U$ включает две стадии. На первой стадии шага t в качестве первого элемента формируемой пары $u_t = (x_i, x_j)$ выбирается первый в векторе $V(t)$ элемент x_i , который помещается в позицию $p_i = (2t-1)$ вектора R , и удаляется из вектора $V(t)$. На второй стадии шага t в качестве второго элемента формируемой пары вероятностным способом в векторе $V(t)$ выбирается элемент $x_j \in V(t)$, который помещается в позицию $i = 2t$ вектора R и удаляется из вектора $V(t)$.

Пример. Пусть $n=10$, опорный вектор $V = \langle x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10} \rangle$. Число ребер совершенного паросочетания в полном графе равно $n/2=5$. t – номер шага, S_1 – первая стадия, S_2 – вторая стадия.

$$t=1.$$

S_1 . Выбор 1 элемента $A1 = x_1$ в $V(t)$.

Включение x_1 в $R(t) = \langle x_1 \rangle$. Удаление x_1 из $V(t)$.

$$V(t) = \langle x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10} \rangle.$$

S_2 . Случайный выбор 2-го элемента $A2 = x_5$ в $V(t)$.

Включение x_5 в список $R(t) = \langle x_1, x_5 \rangle$. Удаление x_5 из $V(t)$. $t=t+1$

$$V(t) = \langle x_2, x_3, x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10} \rangle.$$

$t=2$.

S_1 . Выбор 1 элемента $A1 = x_2$ в $V(t)$.

Включение x_2 в $R(t) = \langle x_1, x_5, x_2 \rangle$. Удаление x_2 из $V(t)$.

$V(t) = \langle x_3, x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10} \rangle$.

S_2 . Случайный выбор 2 элемента $A2 = x_3$ в $V(t)$.

Включение x_3 в $R(2) = \langle x_1, x_5, x_2, x_3 \rangle$. Удаление x_3 из $V(t)$. $t=t+1$.

$V(t) = \langle x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10} \rangle$.

$t=3$.

S_1 . Выбор 1 элемента $A1 = x_4$ в $V(t)$.

Включение x_4 в $R(t) = \langle x_1, x_5, x_2, x_3, x_4 \rangle$. Удаление x_4 из $V(t)$.

$V(t) = \langle x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10} \rangle$.

S_2 . Случайный выбор элемента $A2 = x_{10}$ в $V(t)$.

Включение x_{10} в $R(t) = \langle x_1, x_5, x_2, x_3, x_4, x_{10} \rangle$. Удаление x_{10} из $V(t)$.

$V(t) = \langle x_6, x_7, x_8, x_9 \rangle$.

$t=4$.

S_1 . Выбор 1 элемента $A1 = x_6$ в $V(4)$.

Включение x_6 в $R(t) = \langle x_1, x_5, x_2, x_3, x_4, x_{10}, x_6 \rangle$. Удаление x_6 из $V(t)$.

$V(t) = \langle x_7, x_8, x_9 \rangle$.

S_2 . Случайный выбор 2 элемента $A2 = x_9$ в $V(t)$.

Включение x_9 в $R(t) = \langle x_1, x_5, x_2, x_3, x_4, x_{10}, x_6, x_9 \rangle$. Удаление x_9 из $V(t)$.

$V(t) = \langle x_7, x_8 \rangle$.

$t=5$.

S_1 . Выбор 1 элемента $A1 = x_7$ в $V(t)$.

Включение x_7 в $R(t) = \langle x_1, x_5, x_2, x_3, x_4, x_{10}, x_6, x_9, x_7 \rangle$. Удаление x_7 из $V(t)$.

$V(t) = \langle x_8 \rangle$.

S_2 . Включение x_8 в $R(t) = \langle x_1, x_5, x_2, x_3, x_4, x_{10}, x_6, x_9, x_7, x_8 \rangle$. Удаление x_8 из $V(t)$.

$V(t) = \langle \rangle$.

Построенный код имеет вид в $R = \langle x_1, x_5, x_2, x_3, x_4, x_{10}, x_6, x_9, x_7, x_8 \rangle$.

Коду R соответствует паросочетание

$Q = \langle u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 \rangle, u_1 = \langle x_1, x_5 \rangle, u_2 = \langle x_2, x_3 \rangle, u_3 = \langle x_4, x_{10} \rangle, u_4 = \langle x_6, x_9 \rangle, u_5 = \langle x_7, x_8 \rangle$.

В работе рассматриваются реконфигурируемая архитектура гибридной многоагентной системы поиска решений, базирующаяся на парадигмах роевых алгоритмов. Реконфигурируемая архитектура путем настройки позволяет реализовать следующие методы гибридизации: высокоуровневую и низкоуровневую гибридизацию вложением, типа препроцессор/постпроцессор, ко-алгоритмическую на базе одного или нескольких типов алгоритмов.

Гибридная ко-эволюционная многоагентная система поисковой оптимизации на базе метаэвристик роевых алгоритмов. Анализ методов решения сложных прикладных задач показывает, что применение любого одного алгоритма оптимизации (как классического, так и популяционного) далеко не всегда приводит к успеху [9, 10, 20]. Проблема, с которой сталкиваются разработчики эволюционных алгоритмов, заключается в снижении разнообразия популяции и сужение пространства поиска, что уменьшает вероятность нахождения эффективных решений.

Одним из широко распространенных подходов является гибридизация поисковых алгоритмов. Заложенные в каждой модели метаэвристики при их интеграции усиливают возможности и эффективность алгоритмов. Для поддержки разнообразия популяции решений, расширения области поиска решений разработана архитектура многоагентной биоинспирированной системы в основу которой положен иерархический мультипопуляционный подход.

Разработанный алгоритм решения задачи построения пасочетания, использует архитектуру бионического поиска, и состоит из объединенных процедур роя пчел (РП), роя хромосом (РХ), муравьиного алгоритма (МА), моделирования отжига (МО), что позволяет осуществлять выход из «локальных ям» и увеличивает сходимость алгоритма.

Прежде всего, решающее значение имеет интеграция этапов проектирования в связанный единой методологией маршрут, построенный на единой платформе.

Предложена методология синтеза поисковых алгоритмов, основанных на базовых принципах эволюционных алгоритмов.

Разработка общей структуры гибридных алгоритмов требует решение следующих задач: выбор гибридируемых алгоритмов; определение общей структуры поискового процесса; вычленение функций в каждом гибридируемом алгоритме, которые должны выполняться в составе гибридного поискового алгоритма; разработка методов трансформации данных при сращивании гибридируемых алгоритмов.

Процесс построения совершенного паросочетания выполняется на следующих этапах:

1. Генерация исходного роя хромосом $H = \{H_i | i = 1, 2, \dots, n\}$.
2. Модификация роя хромосом $H = \{H_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ базовыми процедурами пчелиного и роевого алгоритмов.
3. Построения совершенного паросочетания гибридизацией роевого и муравьиного алгоритмов.

На рис. 1 представлена структура гибридной многоагентной системы построения совершенного паросочетания, базирующаяся на гибридизации механизмов муравьиной колонии, роевого и пчелиного алгоритмов. Отличительной особенностью гибридизации является сохранение автономии гибридируемых алгоритмов. Связующим звеном гибридизации является структура данных, описывающая интерпретации решений.

В качестве кода решения используется упорядоченный список R множества вершин графа G , расположенных в позициях $P = \langle p_i | i = 1, 2, \dots, n \rangle$ вектора R , принципы построения которого описаны в выше рассмотренных разделах.

Кодом решения является соответствие между множеством вершин $X = \langle x_i | i = 1, 2, \dots, n \rangle = \langle x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n \rangle$ и множеством позиций $P = \langle p_i | i = 1, 2, \dots, n \rangle$ вектора R . p_i – позиция в R , в которой размещена вершина x_i .

Формирование паросочетания производится путем последовательного просмотра кода решения (вектора R).

В алгоритмах, входящих в состав многоагентной системы, упорядоченный список R представляется в виде хромосомы $H_i = \{h_{il} | l = 1, 2, \dots, n\}$.

Процедуры первого и второго этапов системы базируются на механизмах адаптивного поведения пчелиной колонии. Работа гибридной системы начинается с генерации роем пчел случайным образом произвольного множества отличающихся друг от друга решений в виде исходного множества хромосом $H^0 = \{H_i | i = 1, 2, \dots, n\}$.

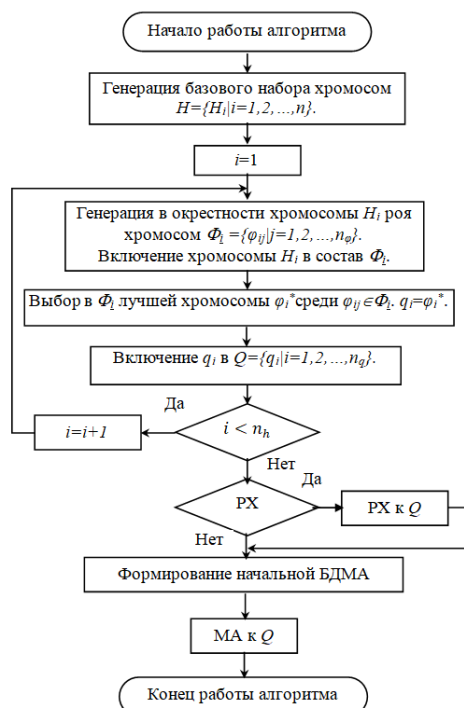


Рис. 1. Структура многоагентной системы построения паросочетания

Хромосома $H_i(t) = \{g_{il} | l=1, 2, \dots, n_i\}$ представляет собой совокупность n генов g_{il} . Значение гена g_{kil} равно значению соответствующего элемента списка R .

Для каждого решения h_i вычисляется значение целевой функции F_i . В множестве H^0 выбираются n_δ лучших решений, которые включаются в множество базовых решений (позиций) H .

При втором подходе реализуется вероятностный выбор H . Вероятность $p(H_i)$ выбора агентом фуражиром базовой хромосомы $H_i \in H^0$ пропорциональна значению целевой функции F_i в этой позиции и определяется как:

$$p(H_i) = F_i / \sum_i (F_i).$$

Далее в окрестности каждой хромосомы $H_i \in H$ формируется рой хромосом:

$$\Phi_i = \{\varphi_{ij} | j=1, 2, \dots, n_\varphi\}.$$

Ключевой операцией пчелиного алгоритма является исследование перспективных решений H_i и их окрестностей $\Phi_i = \{\varphi_{ij} | j=1, 2, \dots, n_\varphi\}$ в пространстве поиска. Остановимся на понятии окрестности. Смысл, изначально вкладываемый в понятие окрестности, заключается в том, что решения, лежащие в окрестности некоторого базового решения, обладают высокой степенью подобия и, как правило, незначительно отличаются друг от друга.

В работе предлагается метод формирования окрестностей Φ_i решений с регулируемой степенью подобия и близости между ними. Основное требование, предъявляемое к вновь сгенерированному решению φ_{ij} , лежащего в θ – окрестности Φ_i базового решения h_i , заключается в том, что оно должно быть представлено виде кода, структура которого описана выше и отвечать свойствам упорядоченного списка R . Для удовлетворения требования разработаны механизмы специальной процедуры синтеза решений φ_{ij} в окрестности Φ_i базового решения H_i .

Формирование нового решения φ_{ij} , лежащего в θ – окрестности базового решения h_i производится путём θ выборочных (случайных) парных перестановок элементов в базовом решении h_i , не нарушающих структуры и свойств упорядоченного списка R .

Возможны два типа перестановок в упорядоченном списке R , удовлетворяющих вышеперечисленным условиям базового решения и сохраняющих свойства упорядоченного списка.

Будем считать, что решение $\varphi_{ij} \in \Phi_i$ лежит в θ – окрестности решения H_i , если φ_{ij} получено путем θ случайных парных перестановок соседних элементов в упорядоченном списке, соответствующем H_i .

В каждое Φ_i дополнительно включается H_i . В составе упорядоченного списка R_v , соответствующего решению H_v , произвольно выбираются две пары элементов: $\langle x_i, x_j \rangle$ и $\langle x_k, x_l \rangle$, соответствующих некоторой паре ребер. В соответствии со свойствами упорядоченной последовательности R_v : $i < j$, $k < l$, $k > i$.

1. Если $(j > k)$, то x_j можно поменять местами с x_l .

Например: в списке $R_v = \langle x_1, x_5, x_2, x_3, x_4, x_{10}, x_6, x_9, x_7, x_8 \rangle$ выбраны две пары: $u_1 = \langle x_1, x_5 \rangle$, $u_2 = \langle x_2, x_3 \rangle$. x_5 и x_3 отвечают условию 1. После перестановки в R_v пары примут вид: $u_1 = \langle x_1, x_3 \rangle$, $u_2 = \langle x_2, x_5 \rangle$.

Новые пары вершин отвечают свойствам упорядоченной последовательности.

Новый список примет вид $R_{v1} = \langle x_1, x_3, x_2, x_5, x_4, x_{10}, x_6, x_9, x_7, x_8 \rangle$.

2. Если $(k > i) \& (l > j)$, то x_j можно поменять местами с x_k .

Например: $u_1 = \langle x_2, x_3 \rangle$, $u_2 = \langle x_4, x_{10} \rangle$. x_4 и x_{10} отвечают условию 2.

После перестановки $u_1 = \langle x_2, x_4 \rangle$, $u_2 = \langle x_3, x_{10} \rangle$.

Новый список примет вид $R_{v1} = \langle x_1, x_5, x_2, x_4, x_3, x_{10}, x_6, x_9, x_7, x_8 \rangle$.

На последующих этапах работы многоагентной системы выполняется поиск решений процедурами, построенными на основе гибридизации роевого и муравьиного алгоритмов. Отличительной особенностью гибридизации является сохранение автономии гибридизируемых алгоритмов. Отметим, что для представления решений в алгоритмах используется единая структура данных, что упрощает стыковку разработанных процедур.

Реконфигурируемая архитектура путем настройки позволяет реализовать следующие маршруты оптимизации.

1 вариант (рис. 1). Генерация исходного роя хромосом $H = \{H_i | i = 1, 2, \dots, n\}$.

В окрестности каждой H_i формируется множество решений $\Phi_i = \{\varphi_{ij} | j = 1, 2, \dots, n_\varphi\}$;

В каждом множестве Φ_i выбирается лучшая хромосома φ_i^* с лучшей оценкой F_i .

На базе лучших решений φ_i^* формируется рой хромосом $Q = \{q_i | i = 1, 2, \dots, n_q\}$. q_i соответствует φ_i^* .

Сформированный рой $Q = \{q_i | i = 1, 2, \dots, n_q\}$ в соответствии с метаэвристикой роя агентов эволюционирует в рой Q^o . Далее выполняется МА.

2 вариант (рис. 2). Генерация исходного роя хромосом $H = \{H_i | i = 1, 2, \dots, n\}$.

В окрестности каждой H_i формируется множество решений $\Phi_i = \{\varphi_{ij} | j = 1, 2, \dots, n_\varphi\}$.

Каждый рой Φ_i эволюционирует в соответствии с метаэвристикой роя агентов в рой Φ_i^o .

В каждом множестве Φ_i^o выбирается лучшая хромосома φ_i^* с лучшей оценкой F_i .

На базе лучших решений φ_i^* формируется рой хромосом $Q = \{q_i | i = 1, 2, \dots, n_q\}$. q_i соответствует φ_i^* .

Рой $Q = \{q_i | i = 1, 2, \dots, n_q\}$ в соответствии с метаэвристикой роя агентов эволюционирует в рой Q^o .

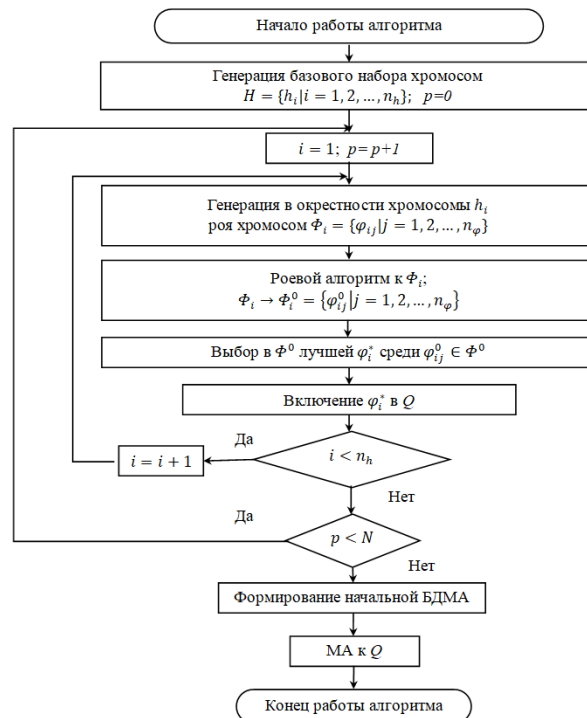


Рис. 2. Структура системы построения паросочетания (2-й вариант)

Модифицированная парадигм роя трансформирующихся хромосом (РТХ).

В работе предлагается подход к построению модифицированной парадигмы роя трансформирующихся хромосом (РТХ) $H = \{H_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, $H_i \in H$, $H_i = \{h_{il} | l = 1, 2, \dots, n_l\}$ с целочисленными значениями генов h_{il} схожий с эволюционными алгоритмами. Этот метод моделирует роевое и стайное поведение животных [1]. В отличие от канонических популяционных методов РТХ работает с одной статической популяцией, члены которой постепенно с появлением информации о пространстве поиска улучшаются. Данный метод представляет собой вид направленной мутации (directed mutation). Решения в виде хромосом в РТХ мутируют в направлении наилучших найденных решений. Хромосомы в РТХ никогда не умирают (т.к. нет селекции).

Хромосома H_i является генотипом некоторого решения (фенотипа Φ_i). Оценка целевой функции фенотипа Φ_i является оценкой целевой функции генотипа H_i . Состояние хромосомы H_i полностью определяет состояние, в котором находится фенотип Φ_i .

Для организации поисковой процедуры необходимо представление объекта оптимизации, наличие операторов, преобразующих одно решение в другое (т.е. осуществляющих переход в пространстве решений от одного решения к другому), а также наличие стратегии поиска в пространстве решений. Какие изменения и на сколько – определяет стратегия поиска. В качестве объекта оптимизации рассматривается хромосома.

Разработана архитектура многоагентной системы, выполняющая поиск решения в аффинном пространстве [16–19], используя в качестве модели роевого интеллекта рой трансформирующихся хромосом.

В качестве аффинно-релаксационной модели (АРМ) роя хромосом используется граф G_a , вершины которого соответствуют хромосомам роя, а ребра соответствуют аффинным связям между хромосомами в аффинном пространстве.

В каноническом методе роя частиц [1, 2] используются геометрические меры близости решений. Решение, соответствующее частице, полностью определяется геометрическими параметрами позиции, в которой размещена частица. Изменение решения реализуется путем перехода частицы в новую позицию. Средство изменения решения представлено в виде универсального аналитического выражения синтеза геометрических параметров новой позиции (координаты в пространстве поиска) в предположении (с надеждой), что решение в данной позиции будет лучше (что не гарантировано).

В методе роя трансформирующиеся хромосом агентами роя являются генотипы решений [4]. В качестве меры близости (сходства) двух хромосом используется аффинность – мера эквивалентности, родственности (сходства, близости) двух хромосом. Вес ребра в графе G_a , связывающего две вершины графа G_a , соответствующие двум хромосомам H_i и H_j , равен аффинности, количественно описывающей степень родственности между H_i и H_j . Эквивалентом оценки, степени родственности (аффинность) двух хромосом H_i и H_j служит параметр степень различия двух хромосом H_i и H_j . В качестве оценки аффинной связи используется параметр степень различия двух хромосом H_i и H_j . Максимизация аффинности двух хромосом H_i и H_j соответствует минимизации степени различия.

В качестве средства изменения решения (трансформации) служит оператор трансформации (направленной мутации), суть которого заключается в изменении генотипа путем изменения целочисленных значений генов h_{il} в хромосоме $H_i(t) = \{h_{il}(t) | l=1, 2, \dots, n\}$. Целью перехода хромосомы в новое состояние является увеличению веса аффинной связи между хромосомами, что равносильно сокращению степени различия [5].

Введём на множестве трансформирующихся хромосом $H_i(t)$ отношение предпочтения $\succ$. Пусть имеются две хромосомы H_i и H_j . Хромосома $H_i(t)$ считается предпочтительней (лучшей), т.е. $H_i(t) \succ H_j(t)$, если выполняется приведённое ниже выражение: $f_i(t) > f_j(t)$ – где $f_i(t)$ и $f_j(t)$ – значение целевой функции H_i и H_j $H(t) = \{H_i(t) | i=1, 2, \dots, n\}$ – рой хромосом, $H_i \in H$, $H_i = \{h_{il} | l=1, 2, \dots, n_i\}$.

$f_i(t)$ – значение целевой функции хромосомы $H_i(t)$;

T – число выполненных итераций;

$H_i^*(t)$ – хромосома H_i в лучшем состоянии, среди состояний, в которых она находилась с начала первой итерации до t -й итерации; $H_i^*(t) = \{h_{il}^*(t) | l=1, 2, \dots, n_i\}$;

$$(H_i^* \succ H_i(t)) \rightarrow f_i^*(t) > f_i(t);$$

$f_i^*(t)$ – значение целевой функции хромосомы в позиции $H_i^*(t)$;

$$f_i^*(t) = \min_{t \in [0: T]} f_i(t). \quad (1)$$

$H^*(t)$ – хромосома роя в лучшем состоянии среди всех состояний всех хромосом роя, в которых они находилась с начала первой итерации до t -й итерации; $H^*(t) = \{h_{il}^*(t) | l=1, 2, \dots, n\}$; $f^*(t)$ – значение целевой функции хромосомы $H^*(t)$.

$$f^*(t) = \min_{i \in [1:N]} f_i^*(t). \quad (2)$$

Алгоритм оптимизации роєм трансформирующихся хромосом (РТХО) имеет вид:

1. Формирование исходного роя трансформирующихся хромосом.
 $H = \{H_i | i = 1, 2, \dots, n_o\}$. $t = 1$.
2. Расчет целевой функции $f_i(t)$ для всех H_i .
3. Выбор лучших хромосом H_i и H_j .
4. Если $t < T$, то $t = t + 1$ и переход к пункту 5, иначе переход к пункту 7.
5. Трансформация всех хромосом роя в новые состояния.
6. Переход к пункту 2.
7. Конец работы алгоритма.

t – номер итерации, T – число итераций.

В процессе поисковой процедуры происходит релаксационное сжатие аффинного графа.

Процесс поиска решений итерационный. В процессе поиска осуществляется перманентные трансформации (переход) хромосом в состояния с лучшим значением целевой функции решения (градиентная стратегия).

На каждой итерации t «лучшие», с точки зрения целевой функции хромосомы, являются аттракторами – «центром притяжения». Векторы трансформации всех хромосом в аффинном пространстве устремляются к этим аттракторам (центрам). Каждая хромосома $H_i(t)$ на шаге t переходит в аффинном пространстве с помощью релаксационной процедуры трансформации в новое состояние $H_i(t+1)$, при котором степень различия между хромосомой $H_i(t)$ и «центром притяжения» уменьшается.

Переход в новые состояния выполняется путем изменения значений генов и структуры хромосом. Целью трансформации хромосомы $H_i(t)$, тяготеющей к лучшей хромосоме $H^*(t)$, в новое состояние $H_i(t+1)$ является минимизация степени различия R_i^* между $H_i(t)$ и $H^*(t)$, что соответствует увеличению веса аффинной связи.

Трансформация, т.е. переход хромосомы $H_i(t)$ в новое состояние $H_i(t+1)$ осуществляется с учетом «степени различия» с лучшей хромосомой $H^*(t)$, либо с интегральной оценкой «степени различия» от группы соседних хромосом и с учетом вероятности перехода в новое состояние. На каждой итерации t осуществляется трансформация (переход) хромосом в состояния с лучшими значениями целевой функции решения (градиентная стратегия).

Если вес аффинной связи между хромосомами рассматривать как расстояние, то в процессе поисковой процедуры происходит релаксационное сжатие аффинного графа.

В качестве средства трансформации – перехода хромосомы $H_i(t)$ в хромосому $H_i(t+1)$ служит оператор направленной мутации (ОНМ), суть которого заключается в изменении целочисленных значений генов в хромосоме $H_i(t)$. ОНМ применяется к заданному числу генов с несовпадающими значениями.

Решением задачи является, построенная в процессе трансформации роя хромосом в аффинном пространстве хромосома, с лучшим значением целевой функции.

Для учета одновременного тяготения хромосомы $H_i(t)$ к хромосомам роя $H^*(t)$ и $H_i^*(t)$ на первом этапе формируется виртуальный центр притяжения роя $H^v(t+1)$. Формирование виртуального центра $H^v(t+1)$ осуществляется путем применения процедуры виртуальной трансформации к хромосоме $H_i(t)$, тяготеющей к хромосоме $H_i^*(t)$, в виртуальную хромосому $H^v(t+1)$.

После определения центра притяжения $H^v(t+1)$ хромосома $H_i(t)$ с помощью процедуры трансформации в направлении виртуальной позиции $H^v(t+1)$ трансформируется в хромосому $H_i(t+1)$.

После трансформации хромосомы $H_i(t)$ в новую $H_i(t+1)$ виртуальная хромосома $H^v(t+1)$ исключается.

Локальная цель трансформации хромосомы – достижение ею состояния с наилучшим значением целевой функции. Глобальная цель роя позиций – формирование оптимального решения задачи.

Трансформация $H_i(t)$ в $H_i(t+1)$ выполняется следующим образом. Последовательно просматриваются (начиная с $l=1$) локусы хромосом $H_i(t)$ и $H^*(t)$ и сравниваются соответствующие им гены, расположенные в одном локусе l .

Если на шаге l значения генов равны, т.е. $h_{il}(t) = h_{il}^*(t)$, то $h_{il}(t+1) = h_{il}^*(t)$.

Если же $h_{il}(t) \neq h_{il}^*(t)$, то в $H_i(t)$ отыскивается ген $h_{ik}(t)$, значение которого равно $h_{il}^*(t)$. Гены $h_{il}(t)$ и $h_{ik}(t)$ в хромосоме $H_i(t)$ меняются местами.

Рассмотрим процедуру *трансформации*, которая реализуется при помощи операции направленной мутации (ОНМ), разработанной авторами, и заключается в изменении взаимного расположения элементов в упорядоченном списке.

Пусть хромосомы $H_i(t) = \{h_{il} | l=1, 2, \dots, n_l\}$ и $H_z(t) = \{h_{zl} | l=1, 2, \dots, n_l\}$ имеют вид:

$$H_z(t) = \langle x_1, x_5, x_2, x_3, x_4, x_{10}, x_6, x_9, x_7, x_8 \rangle. \quad H_i(t) = \langle x_1, x_3, x_2, x_4, x_5, x_9, x_6, x_8, x_7, x_{10} \rangle.$$

Преобразуем вышеприведенные списки вершин в списки индексов вершин для удобства вычислений.

$$H_z^*(t) = \langle 15 \ 23 \ 410 \ 69 \ 78 \rangle. \quad H_i^*(t) = \langle 13 \ 24 \ 59 \ 68 \ 710 \rangle.$$

В качестве степени различия между двумя хромосомами $H_i(t)$ и $H^*(t)$ используется величина R_i^* – пропорциональная числу γ_i генов в трансформируемой хромосоме $H_i(t)$, значения которых не совпадают со значениями соответствующих генов в лучшей хромосоме $H^*(t)$.

$$R_i^* = \varepsilon \cdot \gamma_i. \quad \gamma_i = \sum_l \delta_{il}$$

где $\delta_{il}=0$, если в l -ом локусе хромосом $H_i(t)$ и $H^*(t)$ значения генов $h_{il} = h_{il}^*(t)$; $\delta_{il}=1$, если $h_{il} \neq h_{il}^*(t)$.

Целью трансформации хромосомы $H_i(t)$ является уменьшение степени различия R_i^* между хромосомами $H_i(t)$ и $H^*(t)$. Уменьшение степени различия R_i^* реализуется посредством парных перестановок генов в хромосоме $H_i(t)$.

Пусть в локусе l значения генов различны, $h_{il} \neq h_{il}^*$. $h_{il} \in H_i$, $h_{zl} \in H^*$. В хромосоме H_i отыскивается k -ый локус, в котором $h_{ik} = h_{il}^*$. Далее выполняется парная перестановка генов h_{il} и h_{ik} , размещенных в l -ом и k -ом локусах хромосомы H_i .

Трансформация хромосомы H_i выполняется следующим образом.

Последовательно просматриваются (начиная с первого) локусы хромосом H_i и H^* . Если $h_{il} \neq h_{zl}$, то в хромосоме H_i отыскивается локус k , в котором $h_{ik} = h_{il}$, выполняется парная перестановка генов, размещенных в l -ом и k -ом локусах хромосомы $H_i(t)$, т.е. $h_{il} = h_{ik}$, а $h_{ik} = h_{il}$.

Пример последовательной трансформации роя хромосом. Результат представлен в табл. 1.

Дано: H_i , H^* .

$l=1$, $h_{1l} = h_{1l}^*$.

$l=2$, $h_{12} \neq h_{12}^*$, $h_{12}=3$, $h_{12}^*=5$. Находим в $H_i(2)$ ген $h_{15}=5$. Обмен в $H_i(2)$ генами (h_{12} и h_{15}).

$l=3$, $h_{13} = h_{13}^*$.

$l=4$, $h_{14} \neq h_{14}^*$, $h_{14}=4$, $h_{14}^*=3$. Находим в $H_i(4)$ ген $h_{15}=3$. Обмен в $H_i(4)$ генами (h_{14} и h_{15}).

$l=5$, $h_{15} = h_{15}^*$.

$l=6$, $h_{16} \neq h_{16}^*$, $h_{16}=9$, $h_{16}^*=10$. Находим в $H_i(6)$ ген $h_{110}=9$. Обмен в $H_i(6)$ генами (h_{16} и h_{110}).

$l=7$, $h_{17} = h_{17}^*$.

$l=8$, $h_{18} \neq h_{18}^*$, $h_{18}=8$, $h_{18}^*=9$. Находим в $H_i(8)$ ген $h_{110}=9$. Обмен в $H_i(8)$ генами (h_{18} и h_{110}).

$l=9$, $h_{19} = h_{19}^*$.

$l=10$, $h_{110} = h_{110}^*$.

В приведенном примере выполнена полная трансформация хромосомы H_i в результате которой H_i стала эквивалентна H^* .

В работе для уменьшения степени различия R_i^* между хромосомами H_i и H^* задается число парных перестановок по формуле: $\lambda = k\gamma_i$. При этом λ позиций, подвергающимся трансформациям, выбираются случайным образом.

Таблица 1

Результат последовательной трансформации роя хромосом

1	H_i	H^*	h_{il}	h_l^*	δ_{il}	H_i^*
1	1324 59 68 710	1523 410 69 78.	1	1	0	1324 59 68 710
2	1324 59 68 710	1523 410 69 78	3	5	1	1524 39 68 710
3	1524 39 68 710	1523 410 69 78	2	2	0	1524 39 68 710
4	1524 39 68 710	1523 410 69 78	4	3	1	1523 49 68 710
5	1523 49 68 710	1523 410 69 78	4	4	0	1523 410 69 78
6	1523 49 68 710	1523 410 69 78	9	10	1	1523 410 68 79
7	1523 410 68 79	1523 410 69 78	6	6	0	1523 410 68 79
8	1523 410 68 79	1523 410 69 78	8	9	1	1523 410 69 78
9	1523 410 69 78	1523 410 69 78	7	7	0	1523 410 69 78
10	15 23 410 69 78	15 23 410 69 78	8	8	0	15 23 410 69 78

Построенный на последней итерации рой хромосом используется муравьиным алгоритмом в качестве исходной информации.

Отметим, что для представления решений в алгоритмах используется единая структура данных в виде упорядоченного списка R . В вариантах гибридизации с использованием муравьиного алгоритма (МА) формируется начальная база данных БДМА. В соответствии с методологией МА формируется граф поиска решений G . Каждое решение $q_i \in Q^0$ начальной популяции Q^0 трансформируется в маршрут $m_i(1)$ на графе G . На первой итерации МА на каждом маршруте $m_i(1)$ графе G откладывается феромон в количестве пропорциональном оценке решения $q_i \in Q^0$. На последующих итерациях маршруты $m_i(t)$ формируются в соответствии с используемыми метаэвристиками МА. Ядром канонической структуры МА является конструктивный алгоритм построения маршрута на графе [18]. Отличительной чертой модифицированного МА, является процедура построения упорядоченного маршрута, соответствующего коду решения (списку R), базирующаяся на рассмотренных выше правилах.

Результаты эксперимента. Гибридная многоагентная система построения паросочетания реализована в виде комплекса программ, базирующихся на парадигмах роевых алгоритмов. Реконфигурируемая архитектура путем настройки позволяет реализовать следующие схемы гибридизации:

1. (ПА+РХ) – пчелиный алгоритм, алгоритм роя хромосом.
2. (ПА+МА) – пчелиный алгоритм, муравьиный алгоритм.
3. ((ПА+РХ)+МА) – пчелиный алгоритм, алгоритм роя хромосом, муравьиный алгоритм.
4. ПА+РХ+МА – пчелиный алгоритм, алгоритм роя хромосом, муравьиный алгоритм.

Тестирования вышеуказанных алгоритмов проводились на тестовых задачах.

Для оценки эффективности разработанных методик и программного обеспечения авторами разработаны контрольные примеры построения паросочетаний, для которых заранее известно оптимальное значение F суммарной стоимости ребер, входящих в совершенное паросочетание Q полного графа G .

Обозначим как:

nG – число вершин полного графа G .

nU – число ребер полного графа G .

nQ – число ребер, входящих в состав совершенного паросочетания полного графа G .

Множество U ребер полного графа G разбиваем на два подмножества $U=U_1 \cup U_2$. В состав U_1 входит nQ ребер полного графа G , а в состав U_2 входит остаток $(nU-nQ)$ ребер полного графа G . Ребрам множества U_1 , случайным образом, присваиваются значения в диапазоне от $\partial 1$ до $\partial 2$, а ребрам множества U_2 , случайным образом, присваиваются значения, лежащие в диапазоне от $\partial 3$ до $\partial 4$, причем $\partial 3 > \partial 2$.

Поскольку вес любого ребра из U_1 меньше веса любого ребра из U_2 , то суммарный вес ω_1 ребер множества U_1 будет минимальным: $\omega_1 = \sum_i \varphi_i$, где φ_i вес ребра, входящего в U_1 .

С помощью разработанного программного средства было сгенерировано 5 примеров C1-C5.

C1 – ($nG=10$, $nU=45$, $nQ=5$); C2 – ($nG=20$, $nU=190$, $nQ=10$); C3 – ($nG=30$, $nU=435$, $nQ=15$); C4 – ($nG=40$, $nU=780$, $nQ=20$); C5 – ($nG=50$, $nU=1225$, $nQ=25$).

Каждый пример запускался 10 раз. В табл. 2 для каждого примера приводится среднее значение отклонения оценки решения от оптимального в %, а также среднее значение отклонения оценки решения для каждой схемы гибридизации.

Таблица 2

Результаты проведенных экспериментов

Класс задач	C1	C2	C3	C4	C5	Среднее значение	Количество лучших решений
nG	10	20	30	40	50		
nU	45	190	435	780	1225		
nQ	5	10	15	20	25		
(ПА+PX)	1,5	1,9	2	2,1	2,2	1,94	1
(ПА+МА)	1,4	1,8	2	1,9	1,8	1,78	2
(ПА+PX)+МА)	1,2	1,2	1,3	1,7	1,6	1,14	4
(ПА+PX+МА)	1,3	1,4	1,4	1,8	1,7	1,52	2
Диапазон веса ребер: $\partial Q=<2-4>$; $\partial U=<6-8>$							

Процедура в роевом алгоритме в составе гибрида (ПА+PX) сходится быстрее чем процедура МА в составе гибрида (ПА+МА). Процедура в МА в составе гибрида (ПА+PX)+МА) сходится быстрее чем процедура МА в составе гибрида (ПА+МА).

Лучшие результаты показала программа (ПА+PX)+МА). Первая часть является гибридизацией алгоритма пчелиной колонии и роевого алгоритма. Вторая часть является гибридизацией первой части и алгоритма муравьиной колонии, рис. 3.

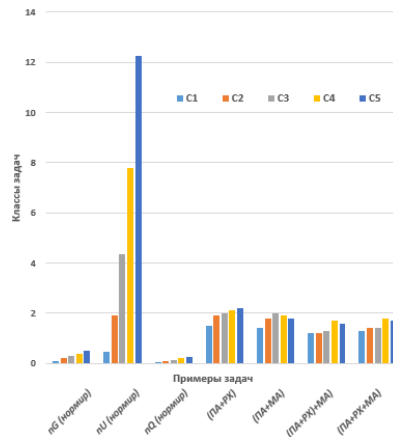


Рис. 3. Графическая иллюстрация результатов работы

В результаты экспериментов было установлено, что показатели качества разработанных алгоритмов имеют более высокие значения чем в работах [6–10]. По сравнению с существующими алгоритмами достигнуто улучшение результатов на 5-8%.

Временная сложность алгоритма (BCA), полученная экспериментальным путем, практически совпадает с теоретическими исследованиями и для рассмотренных тестовых задач составляет ($BCA \approx O(n^2)$).

Заключение. В статье представлена разработанная реконфигурируемая архитектура гибридной многоагентной системы поиска решений, базирующаяся на парадигмах роевых алгоритмов. Реконфигурируемая архитектура путем настройки позволяет реализовать следующие методы гибридизации: высокоуровневую и низкоуровневую гибридиза-

цию вложением, типа препроцессор/постпроцессор, ко-алгоритмическую на базе одного или нескольких типов алгоритмов. Предложена методология синтеза совершенного паросочетания минимального веса в полном графе, основанная на базовых принципах гибридизации поисковых эволюционных процедур.

В работе представлен разработанный новый подход для решения оптимизационных задач на графах построенный на основе интеграции, комбинирования и ко-эволюции роевых методов, отличающийся тем, что заданное число роевых субалгоритмов, используют различные стратегии поиска, функционируют параллельно-последовательно, реализуют более широкий обзор пространства решений, что позволяет обеспечить более высокую вероятность локализации глобального экстремума задачи.

Эксперименты предложенных в работе алгоритмов проводились на тестовых задачах.

Для оценки эффективности разработанных методик и программного обеспечения авторами разработаны контрольные примеры построения паросочетаний, для которых заранее известно оптимальное значение суммарной стоимости ребер, входящих в совершенное паросочетание полного графа.

Первая часть разработанной программы является гибридизацией алгоритма пчелиной колонии и роевого алгоритма. Вторая часть является гибридизацией первой части и алгоритма муравьиной колонии. В результате экспериментов было установлено, что показатели качества разработанных алгоритмов имеют более высокие значения чем в существующих алгоритмах, при этом достигнуто улучшение результатов на 5-8%.

Предложенный новый подход к использованию роевых алгоритмов повысит эффективность, расширит сферы их применения, снизит комбинаторную сложность задачи, позволит организовывать эффективные структуры поиска, формировать компактные интерпретации решений, отражающие коллективную эволюционную память.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андерсон Д. Дискретная математика и комбинаторика. – М.: Вильямс, 2003.
2. Кормен К., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы построение и анализ. – М.: МЦМНО, 2000.
3. Асанов М., Баранский В., Расин В. Дискретная математика: Графы, матроиды, алгоритмы. – СПб.: Изд-во «Лань», 2010.
4. Blum C., Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison // ACM computing surveys. – 2003. – No. 35. – P. 268-308.
5. MAXimal. Алгоритм Куна нахождения наибольшего паросочетания.
6. Bast H., Mehlhorn K., Schafer G. et al. Matching Algorithms Are Fast in Sparse Random Graphs // Theory Comput Syst. – 2006. – P. 3-14.
7. Ding J., Ma Z., Wu Y. et. al. Efficient random graph matching via degree profiles // Probab. Theory Relat. Fields. – 2021. – P. 29-115.
8. Blum N. A new approach to maximal matchings in general graphs // International Colloquium on Automata, Languages, and Programming. – 2017. – P. 586-597.
9. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Эволюционный алгоритм нахождения максимального паросочетания // 3-й Международный НТС «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». – М.: Изд-во Физматлит, 2005. – С. 274-280.
10. Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетический алгоритм определения паросочетаний графа // Тр. 10 международной конференции «Knowledge-dialogue-solution». – 2003. – С. 246-251.
11. Карпенко А.П., Кузьмина И.А. Исследование эффективности структурно-параметрического синтеза одного класса популяционных алгоритмов глобальной оптимизации // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 4. – С. 82-89.
12. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 448 с.
13. Пантелеев А.В., Метлицкая Д.В., Алешина Е.А. Методы глобальной оптимизации: Метаэвристические стратегии и алгоритмы. – М.: Вузовская книга, 2013. – 44 с.
14. Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Решение задачи покрытия на основе эволюционного моделирования // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2009. – С. 101-117.
15. Лебедев Б.К., Лебедев В.Б., Лебедев О.Б. Гибридизация роевого интеллекта и генетической эволюции на примере размещения // Программные продукты, системы и алгоритмы. – 2017. – № 4.
16. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Распределение ресурсов на основе гибридных моделей роевого интеллекта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – № 6. – С. 1063-1073.

17. Карпенко А.П. Типовые структуры популяционных алгоритмов глобальной оптимизации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 1 (25). – С. 48-57.
18. Лебедев О.Б. Модели адаптивного поведения муравьиной колонии в задачах проектирования. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 199 с.
19. Raidl G.R. A Unified view on hybrid Metaheuristics // Lecture Notes In Computer Science. – Springer, 2006. – P. 1-12.
20. Cong J., Romesis M., Xie M. Optimality, scalability and stability study of partitioning and placement algorithms // Proc. of the International Symposium on Physical Design. – 2003. – P. 88-94.

REFERENCES

1. Anderson D. Diskretnaya matematika i kombinatorika [Discrete Mathematics and combinatorics]. Moscow: Vil'yams, 2003.
2. Kormen K., Leyzerson Ch., Rivest R. Algoritmy postroenie i analiz [Algorithms for construction and analysis]. Moscow: MTSMNO, 2000.
3. Asanov M., Baranskiy V., Rasin V. Diskretnaya matematika: Grafy, matroidy, algoritmy [Discrete mathematics: Graphs, matroids, algorithms]. Saint Petersburg: Izd-vo «Lan'», 2010.
4. Blum C., Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison, *ACM computing surveys*, 2003, No. 35, pp. 268-308.
5. MAXimal. Algoritm Kuna nakhozhdeniya naibol'shego parosochetaniya [MAXimal. An algorithmic Kuna designed for the largest number of users.
6. Bast H., Mehlhorn K., Schafer G. et al. Matching Algorithms Are Fast in Sparse Random Graphs, *Theory Comput Syst.*, 2006, pp. 3-14.
7. Ding J., Ma Z., Wu Y. et. al. Efficient random graph matching via degree profiles, *Probab. Theory Relat. Fields.*, 2021, pp. 29-115.
8. Blum N. A new approach to maximal matchings in general graphs, *International Colloquium on Automata, Languages, and Programming*, 2017, pp. 586-597.
9. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Evolyutsionnyy algoritm nakhozhdeniya maksimal'nogo parosochetaniya [An evolutionary algorithm for finding the maximum match], 3-й *Mezhdunarodnyy NTS «Integrirrovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte»* [3rd International Scientific and Technical Conference «Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence»]. Moscow: Izd-vo Fizmatlit, 2005, pp. 274-280.
10. Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskii algoritm opredeleniya parosochetaniy grafa [A genetic algorithm for determining graph combinations], *Tr. 10 mezhdunarodnoy konferentsii «Knowledge-dialogue-solution»* [Proceedings of the 10th International Conference «Knowledge-dialogue-solution»], 2003, pp. 246-251.
11. Karpenko A.P., Kuz'mina I.A. Issledovanie effektivnosti strukturno-parametricheskogo sinteza odnogo klassa populyatsionnykh algoritmov global'noy optimizatsii [Study of the efficiency of structural-parametric synthesis of one class of population algorithms for global optimization], *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical Methods in Technology and Engineering], 2024, No. 4, pp. 82-89.
12. Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: a textbook]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2021, 448 p.
13. Panteleev A.V., Metlitskaya D.V., Aleshina E.A. Metody global'noy optimizatsii: Metaevristicheskie strategii i algoritmy [Methods of global optimization: Metaheuristic strategies and algorithms]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2013, 44 p.
14. Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Reshenie zadachi pokrytiya na osnove evolyutsionnogo modelirovaniya [Solving the problem of coverage based on evolutionary modeling], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2009, pp. 101-117.
15. Lebedev B.K., Lebedev V.B., Lebedev O.B. Gibrizatsiya roevogo intellekta i geneticheskoy evolyutsii na primere razmeshcheniya [Hybridization of swarm intelligence and genetic evolution by the example of placement], *Programmnye produkty, sistemy i algoritmy* [Software products, systems and Algorithms], 2017, No. 4.
16. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Raspredelenie resursov na osnove gibridnykh modeley roevogo intellekta [Resource allocation based on hybrid models of swarm intelligence], *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2017, No. 6, pp. 1063-1073.
17. Karpenko A.P. Tipovyye struktury populyatsionnykh algoritmov global'noy optimizatsii [Typical structures of population algorithms for global optimization], *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2022, No. 1 (25), pp. 48-57.

18. *Lebedev O.B.* Modeli adaptivnogo povedeniya murav'inoi kolonii v zadachakh projektirovaniya [Models of adaptive behavior of an ant colony in design tasks]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 199 p.
19. *Raidl G.R.* A Unified view on hybrid Metaheuristics, *Lecture Notes In Computer Science*. Springer, 2006, pp. 1-12.
20. *Cong J., Romesis M., Xie M.* Optimality, scalability and stability study of partitioning and placement algorithms, *Proc. of the International Symposium on Physical Design*, 2003, pp. 88-94.

Лебедев Борис Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282897933; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; д.т.н.; профессор.

Лебедев Олег Борисович – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89085135512; кафедра информатики; д.т.н.; профессор.

Ганзжур Марина Александровна – Донской государственный технический университет; e-mail: mganzhur@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 89081819111; кафедра вычислительных систем и информационной безопасности; старший преподаватель.

Бесхмельнов Максим Игоревич – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89252622177; кафедра информатики; преподаватель.

Lebedev Boris Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79282897933; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; dr. of eng. sc.; professor.

Lebedev Oleg Borisovich – MIREA – Russian University of Technology; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79085135512; the Department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.

Ganzhur Marina Aleksandrovna – Don State Technical University; e-mail: mganzhur@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79081819111; the Department of Computing Systems and Information; security senior lecturer.

Beskhmelnov Maxim Igorevich – MIREA – Russian University of Technology; e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79252622177; the Department of Computer Science; teacher.

УДК 519.612

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-22-37

Д.А. Береза, Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова

РАЗРАБОТКА АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) является одной из важнейших фундаментальных задач при разработке нового поколения систем проектирования в различных областях науки и техники. Актуальность данного исследования обусловлена ростом объема данных и усложнением задач. Традиционные методы решения СЛАУ, такие как метод Гаусса, метод прогонки, итерационные методы (метод Якоби, метод Зейделя и т.д.), хорошо зарекомендовали себя при работе с относительно небольшими системами. Однако при решении СЛАУ большой размерности данные методы недостаточно эффективны из-за высоких вычислительных затрат и требований к памяти. Одним из перспективных подходов к решению задач высокой сложности является использование агентно-ориентированных систем. Агентно-ориентированные системы предлагают новый способ организации вычислительных процессов, основанный на взаимодействии независимых агентов, каждый из которых выполняет определенную часть задачи. Такой подход позволяет более гибко распределять вычислительные ресурсы и эффективно решать сложные задачи в условиях больших данных. Представлена методика решения уравнений, описывающих математическую модель схемы, с учетом оптимизации соотношения между точностью расчетов и временем их выполнения. В данной работе предлагается агентно-ориентированный алгоритм для решения систем линейных алгебраических уравнений большой размерности. В ходе разработки данного алгоритма был проведен анализ существующих методов и алгоритмов решения СЛАУ, выявлены их преимущества и не-

достатки. Была разработана агентно-ориентированная архитектура для решения СЛАУ большой размерности, предложена организация взаимодействия агентов и механизмы распределения задач между ними. Была выполнена программная реализация разработанного алгоритма. Для оценки эффективности предложенного подхода было проведено его тестирование на ряде тестовых задач. Также была выполнена оценка производительности и масштабируемости разработанного алгоритма, сравнение его с традиционными методами решения СЛАУ.

Автоматизация проектирования; системы линейных алгебраических уравнений; многоагентные системы; эволюционное моделирование; биоинспирированные алгоритмы; сервисно-ориентированная архитектура.

D.A. Bereza, L.A. Gladkov, N.V. Gladkova

DEVELOPMENT OF AN AGENT-BASED ALGORITHM FOR SOLVING SYSTEMS OF LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS OF LARGE DIMENSION

Solving systems of linear algebraic equations (SLAE) is one of the most important fundamental tasks in the development of a new generation of design systems in various fields of science and technology. The relevance of this study is due to the growing volume of data and the increasing complexity of tasks. Traditional methods for solving of SLAE, such as the Gauss method, the run-through method, iterative methods (Jacobi method, Seidel method, etc.), have proven themselves well when working with relatively small systems. However, when solving large-dimensional of SLAE, these methods are not efficient enough due to high computational costs and memory requirements. One of the promising approaches to solving problems of high complexity is the use of agent-based systems. Agent-based systems offer a new way of organizing computing processes based on the interaction of independent agents, each of whom performs a specific part of the task. This approach allows for more flexible allocation of computing resources and efficient solution of complex tasks in a big data environment. A method for solving equations describing a mathematical model of a circuit is presented, taking into account the optimization of the ratio between the accuracy of calculations and the time of their execution. In this paper, we propose an agent-based algorithm for solving systems of linear algebraic equations of large dimension. During the development of this algorithm, an analysis of existing methods and algorithms for solving of SLAE was carried out, their advantages and disadvantages were identified. An agent-oriented architecture was developed to solve large-scale of SLAE, the organization of agent interaction and mechanisms for distributing tasks between them were proposed. A software implementation of the developed algorithm was performed. To evaluate the effectiveness of the proposed approach, it was tested on a number of test tasks. The performance and scalability of the developed algorithm were also evaluated, and it was compared with traditional methods for solving of SLAE.

Design automation; systems of linear algebraic equations; multi-agent systems; evolutionary modeling; bioinspired algorithms; service-oriented architecture.

Введение. Актуальность данного исследования обусловлена возросшей потребностью в эффективных методах решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Решение СЛАУ является одной из важнейших фундаментальных задач при разработке нового поколения систем проектирования в различных областях науки и техники. СЛАУ находят применение в таких сферах, как вычислительная математика, физика, инженерные науки, экономика и т.д. С ростом объема данных и усложнением задач возникает необходимость в разработке эффективных методов и алгоритмов для решения больших СЛАУ, характеризующихся высокой размерностью и сложностью.

В настоящее время совершается переход от традиционных САПР к новому поколению систем проектирования [1]. Новые методы и программные приложения позволяют успешно решать многие задачи, которые ранее невозможно было автоматизировать. Перед специалистами стоит задача разработки фундаментальных принципов построения систем проектирования нового поколения. Традиционные методы решения СЛАУ, такие как метод Гаусса, метод прогонки, итерационные методы (метод Якоби, метод Зейделя и т.д.), хорошо зарекомендовали себя при работе с относительно небольшими системами. Однако при решении больших СЛАУ данные методы могут быть недостаточно эффективны из-за высоких вычислительных затрат и требований к памяти. В связи с этим, в последние годы возрос интерес к разработке параллельных и распределенных алгоритмов, способных эффективно использовать современные вычислительные ресурсы, включая многопроцессорные системы и вычислительные кластеры.

Одним из перспективных подходов к решению задач высокой сложности является использование агентно-ориентированных систем. Агентно-ориентированные системы предлагают новый способ организации вычислительных процессов, основанный на взаимодействии независимых агентов, каждый из которых выполняет определенную часть задачи. Такой подход позволяет более гибко распределять вычислительные ресурсы и эффективно решать сложные задачи в условиях больших данных.

Еще одним перспективным направлением является использование методов эволюционного моделирования для повышения эффективности современных систем проектирования [2–5].

В данной работе предлагается подход к решению задачи решения СЛАУ большой размерности, основанный на использовании агентно-ориентированного подхода. Для решения поставленной задачи необходимо разработать агентно-ориентированную архитектуру для организации взаимодействия агентов, а также механизм распределения задач между ними. На основе предлагаемого подхода предлагается разработать модифицированный алгоритм решения СЛАУ большой размерности и выполнить его программную реализацию. Разработка агентно-ориентированного алгоритма позволит значительно повысить эффективность и скорость решения таких задач, открывая новые возможности для исследований и практических применений.

Постановка задачи. Проектирование системы автоматизированного проектирования (САПР) – это целостный комплекс программных средств, которые синхронизированы и работают в унисон на различных этапах процесса разработки: начиная с момента получения технического задания и заканчивая созданием рабочих фотошаблонов или промежуточных макетов [1].

На рис. 1 представлена упрощенная схема проекта САПР, демонстрирующая взаимосвязь между его этапами.

1. *Формальное описание проекта (Designentry)* – процесс разработки СБИС начинается с создания проекта, который может быть выполнен на языке моделирования аппаратных устройств (например, VerilogHDL или VHDL) или на основе готовой принципиальной схемы.

2. *Логический синтез (Logic synthesis)* – этап, на котором создается список логических элементов и их соединений (netlist).

3. *Разбиение на модули (System partitioning)* – сложные системы делятся на модули, которые затем можно разрабатывать как самостоятельные СБИС или как компоненты общей СБИС.

4. *Логическое моделирование СБИС (Prelayout simulation)* – проверка всех функциональных параметров и характеристик СБИС на логическом уровне. В случае некорректных результатов моделирования, предыдущие этапы 1, 2, 3 повторяются до получения удовлетворительного результата.

5. *Топологическое размещение (Floorplanning)* – расположение модулей и блоков, созданных на основе списка логических элементов и их соединений, на поверхности кристалла СБИС.

6. *Размещение базовых элементов внутри блоков (Placement)* – процедура выбора мест для размещения стандартных элементов библиотеки (Standard Cell) в структурах.

7. *Трассирование и разводка межсоединений (Routing)* – процесс соединения стандартных элементов, модулей и конструкций между собой.

8. *Расчет паразитных характеристик (Extraction)* – вычисление паразитных ёмкостей, сопротивлений и индуктивностей, которые возникают в результате разработанной схемы.

9. *Посттопологическое проектирование (Postlayout simulation)* – анализ функционирования будущей интегральной схемы с учетом паразитных эффектов. В случае, если параметры частоты и нагрузки не соответствуют требованиям, этапы 5-9 повторяются до достижения необходимых характеристик [6–8].

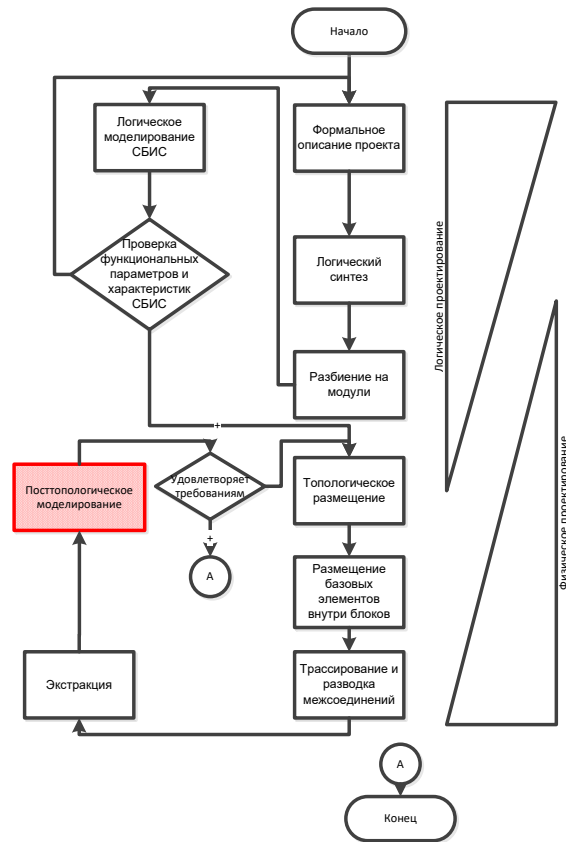


Рис. 1. Укрупненный маршрут проектирования СБИС

Ускорение процесса создания СБИС достигается благодаря использованию унифицированных наборов компонентов, универсальных логических элементов (ЛЭ) или структур, стандартизированных элементов; размещением внутренних связей в промежутках между блоками; а также применением параметризованных стандартных элементов. Функциональность СБИС должна обеспечиваться при минимальном количестве элементов, включая транзисторы, резисторы, ЛЭ, триггеры, регистры и прочее, с использованием строгой структуры. Современные системы автоматизированного проектирования СБИС способны интегрировать программные и аппаратные элементы, в том числе процессорные ядра, программируемую логику, память, интерфейсы, средства внутреннего тестирования, аналоговые и СВЧ компоненты.

В соответствии с матрично-топологической интерпретацией норм теории электрических схем, математическая модель электрической схемы сводится к двум основным категориям:

$$x' = f(x, t) = 0, \quad x(0) = x_0,$$

$$F(x', x, t) = 0, \quad x(0) = x_0,$$

где x – вектор переменных состояния (в качестве которых могут быть выбраны напряжения и/или токи ветвей, напряжения и/или токи реактивных элементов, контурные токи или узловые потенциалы) размерности N ; f – вектор правых частей системы дифференциальных уравнений размерности N , непрерывный вместе со своими производными по времени; t – время; F – вектор системы алгебро-дифференциальных уравнений неявного вида порядка N , x_0 – вектор начальных значений переменных состояния.

После этапа определения паразитных компонентов в RLC-цепи, модель электрической цепи представляется в виде системы линейных дифференциальных уравнений. В современных программах для моделирования электрических схем наиболее широкое распространение нашли методы решения систем дифференциальных уравнений, основанные на неявном подходе и использовании прогнозирования и коррекции. Матрица уравнений, которая решается на каждом этапе интегрирования или итерации, обычно включает в себя сотни или даже тысячи уравнений и характеризуется высокой разреженностью, что означает, что количество ненулевых элементов в каждой строке матрицы A зависит от специфики схемы и метода её математического описания, при этом плотность заполнения уменьшается с увеличением размерности схемы.

Одна из ключевых сложностей, с которой сталкиваются при работе с системой линейных алгебраических уравнений, заключается в том, что даже незначительные корректировки в правой части такой системы могут привести к значительным (превышающим допустимые рамки) изменениям в итоговом решении.

Структура системы линейных алгебраических уравнений представлена следующим образом:

$$Ax = b,$$

где x и b – векторы, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$, $b = (b_1, b_2, \dots, b_n) \in R^n$.

Система линейных алгебраических уравнений может иметь единственное решение, множество решений бесконечного количества или вовсе не иметь решения. Системы с плохой обусловленностью и вырожденные системы могут казаться идентичными при ограничении точности до определенного уровня.

Псевдорешением системы называют вектор $\tilde{x}$, минимизирующий невязку $\|Ax - b\|$ на всем пространстве R^n . Система может иметь не одно псевдорешение. Пусть F_A есть совокупность всех ее псевдорешений и x_1 – некоторый фиксированный вектор из R^n , определяемый обычно постановкой задачи [9-11].

Нормальным относительно вектора x_1 решением системы будем называть псевдорешение x_0 с минимальной нормой $\|x - x_1\|$, т.е. такое, что $\|x^0 - x^1\| = \inf_{x \in F_A} \|x - x^1\|$ [12-15].

В дальнейшем для простоты записи будем x_1 и нормальное относительно вектора $x_1 = 0$ решение называть просто нормальным решением. Для систем типа, описанной в уравнении, существует и единственное нормальное решение, что указывает на нестабильность процесса поиска такого решения в рамках данной системы, как отмечается в работах [10, 12].

Тогда задача решения СЛАУ большой размерности с плохо обусловленной матрицей, сводится к нахождению вектора x , минимизирующего следующий функционал:

$$\|Ax - b\| + 0.1\|x\| \rightarrow \min.$$

Основной целью является повышение эффективности соотношения точности решения к времени его выполнения. С ростом сложности проектов, уровня интеграции и сокращением стандартов в проектировании произошло значительное усложнение процесса проверки корректности. Классические подходы к разработке интегральных схем, используемые методы и привычные инструменты для автоматизированного проектирования не в состоянии гарантировать приемлемые временные рамки для проектирования схем на наноуровне.

Увеличение производительности в решении математических моделей может нанести значительный вклад в повышение эффективности верификационного процесса и всего этапа моделирования после настройки схемы.

В начальной стадии схемотехнического проектирования ключевым аспектом является создание модели, которая точно отображает как статические, так и динамические характеристики работы схемы. Это включает в себя решение математических уравнений, связанных с конкретными схемотехническими решениями. На рис. 2 перечислены различные численные методы, применяемые в программном обеспечении САПР СБИС для решения этих уравнений.

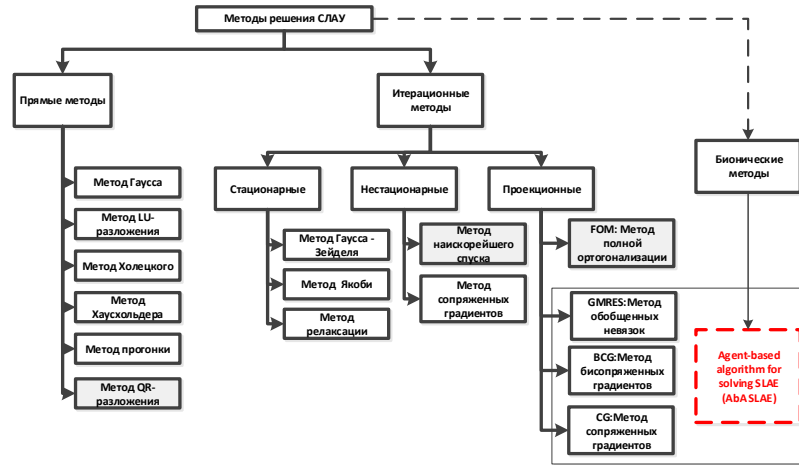


Рис. 2. Методы решения СЛАУ

В конечном счете, для анализа как статических, так и динамических условий, необходимо найти решение систем линейных алгебраических уравнений. Основной фактор, влияющий на потребление ресурсов компьютера для обработки этих задач, это эффективность используемых алгоритмов.

В общем случае, методы для решения СЛАУ разделяют на точные (прямые) методы (вычисления всегда с точностью до знака) и приближенные (итерационные) методы (вычисления приближены к точным, в теории).

Поскольку каждая формула коэффициентов выводится из предыдущей, то в случае появления ошибки она начнет постепенно накапливаться и, в результате, может достичь критического значения.

На данный момент наиболее эффективными для решения СЛАУ большой размерности считаются проекционные методы, основанные на подпространстве Крылова. Пусть существуют некоторые два пространства $K \subset R^n$ и $L \subset R^n$. Тогда необходимо найти такой вектор $x \in K$, который будет обеспечивать решение исходной системы, «оптимальное относительно подпространства L », чтобы было выполнено условие Петрова-Галеркина:

$$\forall l \in L: (Ax, l) = (b, l).$$

Данную постановку задачи будем называть задачей проектирования вектора x на подпространство K ортогонально к подпространству L .

Выберем в качестве пространства K пространство Крылова $K_m(r_0, A)$, в качестве L – пространство $K_m(\check{r}_0, A^T)$, где вектор $\check{r}_0$ удовлетворяет условию $(\check{r}_0, r_0) \neq 0$. В данном методе используется процедура Ланцоша. Решение задается формулой:

$$x_m = x_0 + \beta V_m T_m^{-1} e_1,$$

где $\beta = (\check{r}_0, r_0)$.

Основное достоинство метода – способность решать СЛАУ большой размерности [10, 12–14]. А главным недостатком данного метода и всех основанных на нем методов является невозможность преодолевать выявленные в области определения уравнений овраги ландшафта.

Предположим, что матрица системы линейных алгебраических уравнений и вектор правых частей заданы неточно и вместо исходной системы:

$$Ax = b, \quad (1)$$

где A – матрица с элементами $a_{ij} \in \mathbb{R}$, $A = \{a_{ij}\}$, x – искомый вектор с координатами $x_j \in \mathbb{R}$, $x = \{x_j\}$, b – известный вектор с координатами $b_j \in \mathbb{R}$, $x = \{b_j\}$, $i, j = 1, 2, \dots, n$; n – размер СЛАУ.

В действительности решается другая система:

$$A_1 x = b_1, \text{ где } A_1 = A + \Delta, b_1 = b + \eta. \quad (2)$$

Обозначим решения (1) и (2) через x и x_1 .

Проведем оценку погрешности решения $z = x - x_1$.

Подставляем выражения A_1 , b_1 , x_1 в (2)

$$(A + \Delta)(x + z) = b + \eta.$$

Вычитая (1), получим

$$Az + \Delta x + \Delta z = \eta,$$

$$z = A^{-1}(\eta - \Delta x - \Delta z),$$

$$z = A^{-1}(\eta - \Delta x - \Delta z),$$

$$\|z\| \leq \|A^{-1}\|(\|\eta\| + \|\Delta\|\|x\| + \|\Delta\|\|z\|).$$

Если малы $\|\Delta\|$ и $\|\eta\|$, то следует ожидать и малости $\|z\|$. В результате чего окажется, что слагаемое Δz будет иметь более высокий порядок малости.

Оценка погрешности в таком случае будет выглядеть следующим образом:

$$\|z\| \leq \frac{\|A^{-1}\|(\|\eta\| + \|\Delta\|\|x\|)}{1 - \|A^{-1}\|\|\Delta\|}. \quad (3)$$

Часто случается, что погрешность правой части больше погрешности самой системы, а ниже рассмотрим случай, когда задача поставлена точно. Тогда, полагая $\Delta = 0$ в (3), имеем

$$\|z\| \leq \|A^{-1}\|\|\eta\|. \quad (4)$$

В целях точной оценки взаимосвязи между ошибками в правой части и искомого ответа используется концепция устойчивости матрицы системы. Оптимальнее всего описать особенности системы через взаимодействие между относительными ошибками в правой части и искомым ответе.

Для расчета относительной ошибки решения можно воспользоваться формулой (4):

$$\frac{\|z\|}{\|x\|} \leq \|A^{-1}\| \frac{\|\eta\|}{\|x\|}. \quad (5)$$

$$Ax = b, \text{ отсюда,}$$

подставляя оценку для $\|x\|$ в (5), имеем

$$\frac{\|z\|}{\|x\|} \leq \|A^{-1}\|\|A\| \frac{\|\eta\|}{\|b\|}. \quad (6)$$

Величина $\|A^{-1}\|\|A\| = \text{cond}A$ является мерой обусловленности матрицы.

В случае, когда показатель обусловленности матрицы достигает значительных величин, то уровень относительной ошибки в вычислении решения может возрасти до высоких значений, даже при неизменной относительной погрешности в правой части системы. Обусловленность матрицы тесно связана с выбором нормы для ее измерения. Существует прямая зависимость между любым выбранным критерием нормирования матрицы и ее наибольшим по величине собственным числом: $\|A\| \geq \max |\lambda_A|$. Собственные значения матрицы A и A^{-1} взаимно обратны; поэтому

$$\|A^{-1}\| \geq \max \frac{1}{|\lambda_A|} = \frac{1}{\min |\lambda_A|}.$$

Таким образом,

$$\text{cond}A \geq \frac{\max|\lambda_A|}{\min|\lambda_A|} \geq 1.$$

Если число обусловленности $\text{cond}A = \|A^{-1}\| \|A\|$ мало, то система называется хорошо обусловленной, и плохо обусловленной, когда оно высоко. Размер, который считается критическим для числа обусловленности, определяется точностью вычислительного устройства (количество цифр t , используемых для записи мантиссы числа). Если вычисления производятся на компьютере с точностью t (согласно погрешности входных данных, равным $O(2^{-t})$), то при обусловленности, равной $O(2^{t/2})$, невозможно обеспечить точность выше $O(2^{-t/2})$.

Анализ выражения $\text{cond}A = \frac{\max|\lambda_A|}{\min|\lambda_A|}$ показывает, что большие значения обусловленности матрицы A могут возникать либо при малых значениях $\min|\lambda_A|$, либо при больших значениях $\max|\lambda_A|$ [10, 14].

Математическое описание электрической цепи, представленное в виде набора дифференциальных уравнений, обычно сводится к моделированию цепей RLC или RC. Эти модели представляют собой системы линейных дифференциальных уравнений. В современных программных комплексах для моделирования электрических схем наиболее популярны методы, основанные на неявном подходе и технике прогноза и коррекции. В рамках таких методов на каждом этапе выполняется решение системы уравнений, которые могут быть как линейными, так и нелинейными. Для решения нелинейных систем уравнений часто применяется метод Ньютона, который обеспечивает наибольшую скорость сходимости итерационного процесса. Это означает, что на каждом шаге исходная система нелинейных алгебраических уравнений преобразуется в систему линейных уравнений, что упрощает решение задачи.

Процесс решения уравнений, составляющих математическую модель СБИС, включает следующие этапы:

Первый этап – это разбор уравнений, которые отражают структуру математической модели электрической системы. При этом производится классификация систем уравнений по их типу: системы дифференциальных уравнений, системы нелинейных уравнений и системы линейных алгебраических уравнений.

На втором этапе проекта мы приступаем к вычислениям:

- ♦ в случае, если математическая модель описывается линейными дифференциальными уравнениями, применяем модифицированный неявный метод Рунге-Кутты. На каждом этапе этого метода решаем систему линейных алгебраических уравнений с помощью специализированного алгоритма. Для более сложных случаев, где на каждом этапе интегрирования возникает система нелинейных уравнений, используем модифицированный метод Ньютона, который также включает в себя решение системы линейных алгебраических уравнений на каждой итерации;

- ♦ если уравнения математической модели представлены в виде системы нелинейных уравнений, применяем разработанный модифицированный метод, основанный на методе Ньютона. На каждой итерации этого метода решаем систему линейных алгебраических уравнений с помощью разработанного специализированного алгоритма;

- ♦ в случае, если математическая модель представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, решаем ее с помощью модифицированного метода решения систем линейных алгебраических уравнений.

На третьем этапе анализируем полученные результаты.

На рис. 3 представлена предложенная модифицированная методика решения уравнений ММ СБИС. Штриховкой отмечены модифицированные блоки решения систем линейных алгебраических уравнений.

Эволюционный алгоритм решения уравнений математических моделей СБИС.

В предлагаемом подходе к решению систем нелинейных уравнений каждая итерация начинается с преобразования исходной системы в линейный вид. Это обстоятельство позволяет переформулировать задачу как решение системы линейных алгебраических уравнений с применением модифицированного метода.

$$Ax = b,$$

где A – матрица с элементами $a_{ij} \in R, A = \{a_{ij}\}$, x – искомый вектор с координатами $x_j \in R, x = \{x_j\}$, b – известный вектор с координатами $b_j \in R, b = \{b_j\}, i, j = 1, 2, \dots, n$; n – размер СЛАУ.

В контексте генетического алгоритма хромосома является вектором x , который в ходе эволюции популяции подвергается процессу оптимизации [16].

Состав хромосомы, включающий в себя гены, которые определяют вектор неизвестных переменных x , а также дополнительные гены, необходимые для сбора данных о результативности работы операторов кроссинговера и мутации, представлен на рис. 4 [16].

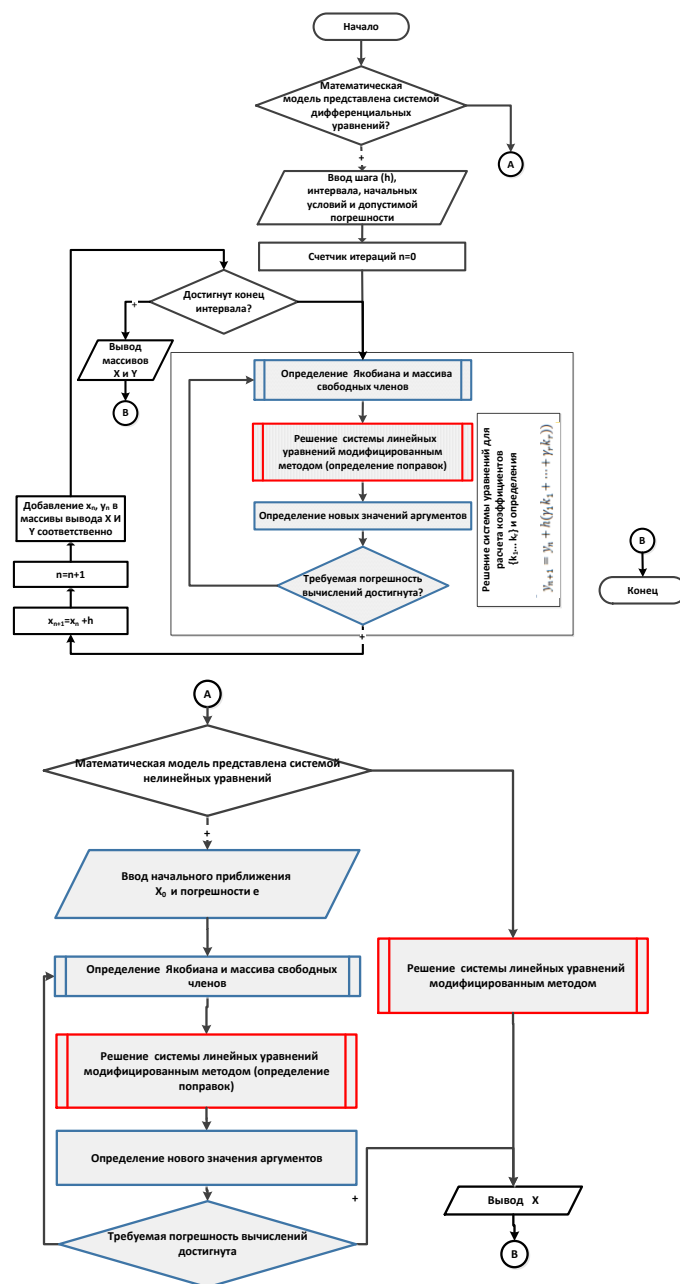


Рис. 3. Методика решения уравнений математической модели СБИС



Рис. 4. Схема хромосомы

Комплект генетических операторов был отобран так, чтобы позволять работать с числами с плавающей точкой. Информационные гены включают в себя детали о том, каким генетическим методом была создана хромосома. Этот данный критически важен для оценки результативности используемых генетических операций.

Значения служебного гена S_k (служебный ген для оператора кроссинговера):

1. Арифметический оператор кроссинговера.
2. Расширенный линейный кроссинговер.
3. Дискретный кроссинговер.
4. Двухточечный оператор кроссинговера.

Значения служебного гена S_m (служебный ген для оператора мутации):

1. Мутация с имитацией отжига.
2. Модифицированная равномерная мутация.
3. Гауссовская мутация.
4. Равномерная мутация.
5. Корректирующая мутация.
6. Мутация обобщенных минимальных невязок.
7. Мутация бисопряженных градиентов.

Разработка агентно-ориентированного алгоритма решения СЛАУ большой размерности. Для повышения эффективности решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) был предложен комбинированный метод на основе интеграции эволюционных методов отбора и методов оптимизации с использованием теории Парето.

Алгоритм функционирует на основе разделения исходной СЛАУ на k -сегментов, каждый из которых включает m -уравнений:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \quad \text{Блок 1}$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots + a_{mn}x_n = b_m$$

$$a_{m+1,1}x_1 + a_{m+1,2}x_2 + a_{m+1,3}x_3 + \dots + a_{m+1,n}x_n = b_{m+1}$$

Блок 2

.....

$$a_{2^*m,1}x_1 + a_{2^*m,2}x_2 + a_{2^*m,3}x_3 + \dots + a_{2^*m,n}x_n = b_{2^*m},$$

.....

$$a_{k^*m,1}x_1 + a_{k^*m,2}x_2 + a_{k^*m,3}x_3 + \dots + a_{k^*m,n}x_n = b_{k^*m}. \text{ Блок } k$$

.....

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n = b_n.$$

Основная идея состоит в применении оптимизирующей функции, основанной на идеальных нечетко-решениях, расположенных на пределе Парето. Поиск решения для системы линейных алгебраических уравнений с матрицей, характеризующейся невысокой степенью обусловленности, при помощи усовершенствованного подхода, сводится к определению вектора x , который минимизирует данный функционал:

$$F = \|Ax - b\| + 0,1\|x\| + Fp \rightarrow \min.$$

где $\|Ax - b\|$ – евклидова норма невязки; $\|x\|$ – евклидова норма вектора x ; F_p – значение эффективности, полученное по принципу Парето.

При решении системы линейных алгебраических уравнений всегда существует вероятность появления нескольких решений с минимальной длиной вектора x . В таких случаях предпочтение отдается решениям, которые минимизируют ошибку для всех блоков, находящихся на границе Парето. Исходя из этого для решения соответствующих систем линейных алгебраических уравнений будет использован модифицированный метод, который был специально адаптирован для работы с системами большой размерности.

Система нелинейных уравнений выглядит следующим образом:

$$F(\mathbf{x}) = 0,$$

где $\mathbf{x}$ – вектор искомых токов и/или напряжений $x_j \in R, \mathbf{x} = \{x_j\}$,

Введем следующие обозначения:

ε – допустимая погрешность, $\mathbf{A}$ – матрица с элементами $a_{ij} \in R, \mathbf{A} = \{a_{ij}\}$, матрица Якоби, $\mathbf{b}$ – известный вектор с координатами $b_j \in R, i, j = 1, 2, \dots, n; n$ – количество уравнений; $\Delta \mathbf{x}$ – вектор решений системы линейных уравнений $\Delta x_j \in R, \Delta \mathbf{x} = \{\Delta x_j\}$.

Ниже (рис. 5) представлен псевдокод алгоритма вычислительного агента.

1. Φ_0 – вектор начального приближения решения;
2. $r_0 = b - A\Phi_0$;
3. $\bar{r}_0$ – произвольный вектор, такой, что $(\bar{r}_0, r_0) \neq 0$;
4. $\rho_0 = \alpha = \omega_0 = 1$;
5. $v_0 = p_0 = 0$;
6. для $k = 1, 2, 3, \dots$
7. $\rho_k = (\bar{r}_0, r_{k-1}); \beta = \left(\frac{\rho_k}{\rho_{k-1}}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega_{k-1}}\right)$;
8. $p_k = r_{k-1} + \beta(p_{k-1} - \omega_{k-1}v_{k-1})$;
9. определение вектора u из решения системы $Mu = p_k$;
10. $v_k = Au$;
11. $\alpha = \frac{\rho_k}{(\bar{r}_0, v)}$;
12. $s = r_{k-1} - \alpha v_k$;
13. определение вектора z из решения системы $Mz = s$;
14. $t = Az$;
15. $w_k = \begin{pmatrix} t, s \end{pmatrix}$;
16. $\Phi_k = \Phi_{k-1} + \alpha u + \omega_k z$;
17. если Φ_k достигло требуемой точности – выход из цикла;
18. $r_k = s - \omega_k t$;
19. конец цикла по k

Рис. 5. Обобщенный алгоритм вычислительного агента

На рис. 6 приведен обобщенный агентно-ориентированный алгоритм решения больших систем линейных уравнений (СЛАУ).

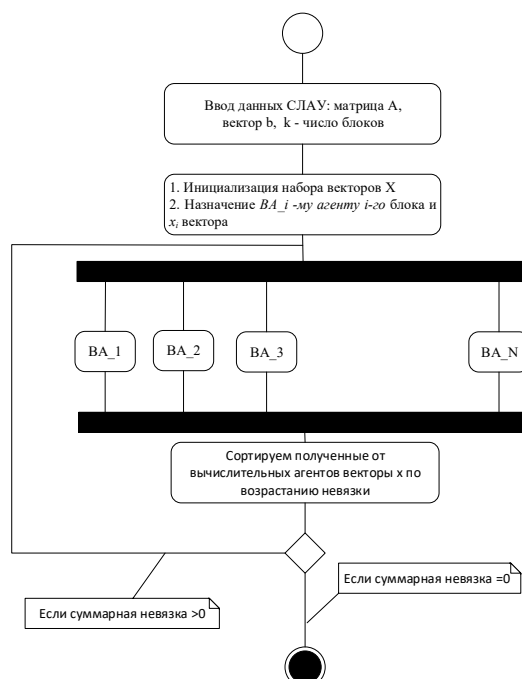


Рис. 6. Обобщенный агентно-ориентированный алгоритм решения больших систем линейных уравнений (СЛАУ)

Разработка многоуровневой мультиагентной архитектуры. Сервисно-ориентированная архитектура предполагает создание отдельных, независимых сервисов, каждый из которых реализует определенную бизнес-функцию, использует стандартизованные протоколы и интерфейсы для взаимодействия сервисов, а также управляет своим собственным состоянием и контекстом. Модульный подход позволяет легко заменять или повторно использовать компоненты, без изменения системы в целом, а также отслеживать их состояние, что аналогично принципу работы агентов в многоагентных системах (МАС). В МАС каждый агент также может быть рассмотрен как независимый модуль, выполняющий определенные задачи [16–18].

Программный агент представляет собой саморегулируемую систему, которая способна адаптироваться к окружающей среде, инициировать в ней изменения и, при необходимости, взаимодействовать с пользователем или другими агентами.

Применение агентов находит свое отражение в области моделирования; оптимизации и планирования; обеспечения автоматизации процессов и др. [19, 20].

На рис. 7. приведена структура эффективной многоагентной системы, способной к масштабированию.

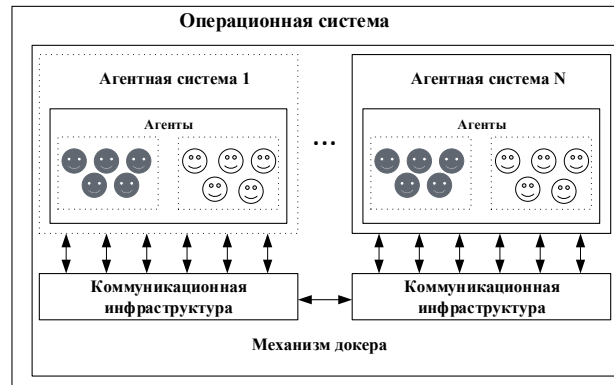


Рис. 7. Масштабируемая мультиагентная система

Результаты вычислительных экспериментов. Для тестирования разработанного алгоритма, основанного на агентных подходах, были проведены серии экспериментов на СЛАУ различных размеров, начиная от 100×100 и до 900×900 . Исходя из теоремы Бернулли, размер экспериментальной выборки определяется исходя из желаемой допустимой ошибки и доверительной вероятности, в соответствии с таблицами статистических распределений. Доверительная вероятность, также известная как "мера риска", представляет собой вероятность, на основе которой выводы сделаны. Чем выше эта вероятность, тем более надежной является вывод. Обычно принимается $P = 0,95$. Размер допустимой ошибки E определяется в зависимости от специфики исследуемого процесса, и в большинстве случаев устанавливается на уровне 0,05. Для выбранных значений допустимой ошибки и доверительной вероятности, количество наблюдений составляет 384. Однако, чтобы сократить время вычислений, было решено установить доверительную вероятность на уровне 0,9 и допустимую ошибку на уровне 0,1, что позволило уменьшить размер выборки до 50.

В ходе тестирования алгоритма, основанного на агентном подходе, были проведены серии экспериментов, каждая из которых включала 50 СЛАУ.

Результаты исследования, направленного на оценку временных характеристик разработанного алгоритма, представлены в табл. 1. В таблице указаны следующие параметры: в первой колонке «№ п/п серии» обозначен номер серии экспериментов, во второй колонке «Размер серии» указан объем экспериментов в каждой серии, в колонке «Размер СЛАУ» представлен объем системы линейных алгебраических уравнений. В колонке «Время решения (сек.)» указан средний показатель времени, затрачиваемого на решение задачи для каждой серии.

Таблица 1

Результаты экспериментов

№ п/п серии	Размер серии	Размер СЛАУ	Время решения (сек.)
1	50	500*500	2302
2	50	600*600	4264
3	50	700*700	4553
4	50	800*800	8123
5	50	900*900	12777

После проведения регрессионного анализа была получена зависимость времени решения задачи от размера СЛАУ:

$$y = 0,0313x^2 - 16,693x + 2744,9.$$

На рис. 8 представлен график, отражающий полученную взаимосвязь. Исходя из данного изображения, можно констатировать, что выявленная в результате регрессионного анализа зависимость соответствует экспериментально обнаруженной с высокой степенью точности, поскольку разброс регрессионной линии относительно экспериментальных данных незначителен.

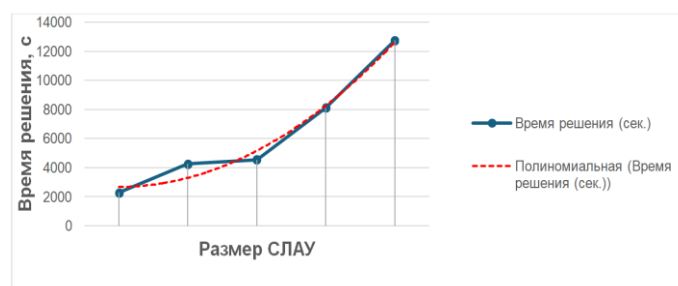


Рис. 8. Зависимость времени решения от размера СЛАУ

В ходе проведенных испытаний для агентно-ориентированного алгоритма AbA SLAE был выявлен полиномиальный характер зависимости времени выполнения задачи решения СЛАУ от её размерности, что нашло свое подтверждение в теоретических предположениях.

Заключение. Анализ экспериментальных результатов показывает, что метод, основанный на агентной модели, проявляет значительную эффективность при решении систем линейных уравнений. В отличие от других стратегий, данный подход не испытывает потери точности с ростом числа переменных. К тому же, время работы алгоритма растёт квадратично, что является его дополнительным достоинством.

В дальнейшем предполагается разработать гибридный эволюционный алгоритм решения СЛАУ, что позволит повысить эффективность его работы [23, 24].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alpert Charles J., Mehta Dinesh P., Sapatnekar Sachin S.* Handbook of algorithms for physical design automation. – CRC Press, New York, USA, 2009.
2. *Гладков Л.А., Кравченко Ю.А., Курейчик В.В., Родзин С.И.* Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации: монография. – Чебоксары: Среда, 2024.
3. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2011.
4. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: МГТУ им. Баумана, 2014.
5. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В.* Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009.
6. *Cohon J.P., Karro J., Lienig J.* Evolutionary Algorithms for the Physical Design of VLSI Circuits. Advances in Evolutionary Computing: Theory and Applications / Ghosh, A., Tsutsui, S. (eds.). – Springer Verlag, London, 2003.

7. Гридин В.Н. Численно-аналитическое моделирование радиоэлектронных схем. – М.: Наука, 2008.
8. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – СПб.: Лань, 2006.
9. Бойко А.Я., Безруков А.Е., Русаков А.С., Ткачев Д.Ф., Хапаев М.М. Новый алгоритм вычисления двумерных емкостей в задаче экстракции емкости // II Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем»: Сб. научных трудов / под общ. ред. А.Л. Стемпковского. – М.: ИПИМ РАН, 2006.
10. Потапов Ю. Технология экстракции паразитных параметров для моделирования межсоединений // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 6. – С. 22-26.
11. Баландин М.Ю., Шурина Э.П. Методы решения СЛАУ большой размерности. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.
12. Рено Н.Н. Численные методы. – М.: КДУ, 2007.
13. Li R.-C., Ye Q. A Krylov subspace method for quadratic matrix polynomials with application to constrained least squares problems // SIAM J. Matrix Anal. Appl. – 2003. – 25. – P. 405-428.
14. Calvetti D, Reichel L, Shuibi A. Enriched Krylov subspace methods for ill-posed problems // Linear Algebra and its Applications. – 2003. – Vol. 362. – P. 257-273.
15. Calvetti D, Lewis B, Reichel L. On the regularizing properties of the GMRES method // Numerische Mathematik. – 2002. – Vol. 91. – P. 605-625.
16. Бегляров В.В., Берёза А.Н., Ляшов М.В. Бионический алгоритм решения систем линейных алгебраических уравнений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 12 (101). – С. 46-52.
17. Тарасов В.Б., Голубин А.В. Эволюционное проектирование: на границе между проектированием и самоорганизацией // Известия ТРТУ. – 2006. – № 8 (63). – С. 77-82.
18. Майоров И.В., Скобелев П.О. Модель динамики агентов потребностей и возможностей // Тр. XVII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 2015. – Самара: СНЦ РАН, 2015. – С. 79-87.
19. Скобелев П.О. Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге // Онтологии проектирования. – 2013. – № 2 (8). – С. 26-48.
20. Гридин В.Н., Дмитриевич Г.Д., Анисимов Д.А. Архитектура распределенных сервис-ориентированных систем автоматизированного проектирования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 51-58.
21. Мутра Р., Надареишвили И. Микросервисы. От архитектуры до релиза. – СПб.: Питер, 2023.
22. Baqais A.A.B. A Multi-view Comparison of Various Metaheuristic and Soft Computing Algorithms // I.J. Mathematical Sciences and Computing. – 2017. – 1.3 (4). – P. 8-19.
23. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gusev N.Y., Semushina N.S. Integrated approach to the solution of computer-aided design problems // Proceedings of the 4th International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI'19). Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, Cham, 2020. – Vol. 1156. – P. 465-476.
24. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Leiba S.N., Strakhov N.E. Development and research of the hybrid approach to the solution of optimization design problems // Advances in Intelligent Systems and Computing, V. 875. International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry IITI'18. – Springer Nature Switzerland AG, 2019. – Vol. 2. – P. 246-257.

REFERENCES

1. Alpert Charles J., Mehta Dinesh P., Sapatnekar Sachin S. Handbook of algorithms for physical design automation. CRC Press, New York, USA, 2009.
2. Gladkov L.A., Kravchenko Yu.A., Kureychik V.V., Rodzin S.I. Intel'lektual'nye sistemy: modeli i metody metaevristicheskoy optimizatsii: monografiya [Intelligent systems: models and methods of metaheuristic optimization: monograph]. Cheboksary: Sreda, 2024.
3. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2011.
4. Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy [Modern algorithms of search engine optimization. Algorithms inspired by nature]. Moscow: MGTU im. Baumana, 2014.
5. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M., Sorokoletov P.V. Bioinspirirovannyye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009.
6. Cohoon J.P., Karro J., Lienig J. Evolutionary Algorithms for the Physical Design of VLSI Circuits. Advances in Evolutionary Computing: Theory and Applications, Ghosh, A., Tsutsui, S. (eds.). Springer Verlag, London, 2003.
7. Gridin V.N. Chislennno-analiticheskoe modelirovanie radioelektronnykh skhem [Numerical and analytical modeling of electronic circuits]. Moscow: Nauka, 2008.

8. *Atabekov G.I.* Osnovy teorii tsepey [Fundamentals of circuit theory]. Saint Petersburg: Lan', 2006.
9. *Boyko A.Ya., Bezrukov A.E., Rusakov A.S., Tkachev D.F., Khapaev M.M.* Novyy algoritm vychisleniya dvumernykh emkostey v zadache ekstraksii emkosti [New algorithm for calculating two-dimensional capacitances in the problem of capacitance extraction], *II Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Problemy razrabotki perspektivnykh mikroelektronnykh sistem»*: Sb. nauchnykh trudov [II All-Russian scientific and technical conference "Problems of developing promising microelectronic systems": Collection of scientific papers], ed. by A.L. Stempkovskogo. Moscow: IPPM RAN, 2006.
10. *Potapov Yu.* Tekhnologiya ekstraksii parazitnykh parametrov dlya modelirovaniya mezhsoedineniy [Technology of extraction of parasitic parameters for modeling interconnections], *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in the electronic industry], 2007, No. 6, pp. 22-26.
11. *Balandin M.Yu., Shurina E.P.* Metody resheniya SLAU bol'shoy razmernosti [Methods for solving high-dimensional SLAEs]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2000.
12. *Reno N.N.* Chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow: KDU, 2007.
13. *Li R.-C., Ye Q.* A Krylov subspace method for quadratic matrix polynomials with application to constrained least squares problems, *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 2003, 25, pp. 405-428.
14. *Calvetti D., Reichel L., Shuibi A.* Enriched Krylov subspace methods for ill-posed problems, *Linear Algebra and its Applications*, 2003, Vol. 362, pp. 257-273.
15. *Calvetti D., Lewis B., Reichel L.* On the regularizing properties of the GMRES method, *Numerische Mathematik*, 2002, Vol. 91, pp. 605-625.
16. *Beglyarov V.V., Bereza A.N., Lyashov M.V.* Bionicheskiy algoritm resheniya sistem lineynykh algebraycheskikh uravneniy [Bionic algorithm for solving systems of linear algebraic equations], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 12 (101), pp. 46-52.
17. *Tarasov V.B., Golubin A.V.* Evolyutsionnoe proektirovaniye: na granitse mezhdru proektirovaniem i samoorganizatsiey [Evolutionary design: on the border between design and self-organization], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 8 (63), pp. 77-82.
18. *Mayorov I.V., Skobelev P.O.* Model' dinamiki agentov potrebnostey i vozmozhnostey [Model of the dynamics of agents of needs and opportunities], *Tr. XVII Mezhdunarodnoy konferentsii «Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh»*, Samara, 2015 [Proceedings of the XVII International Conference "Problems of Control and Modeling in Complex Systems", Samara, 2015]. Samara: SNTS RAN, 2015, pp. 79-87.
19. *Skobelev P.O.* Situatsionnoye upravlenie i mul'tiagentnye tekhnologii: kollektivnyy poisk soglasovannykh resheniy v dialoge [Situational management and multi-agent technologies: collective search for agreed solutions in dialogue], *Ontologii proektirovaniya* [Ontologies of design], 2013, No. 2 (8), pp. 26-48.
20. *Gridin V.N., Dmitrevich G.D., Anisimov D.A.* Arkhitektura raspredelennykh servis-orientirovannykh sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya [Architecture of distributed service-oriented automated design systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 51-58.
21. *Mitra R., Nadareishvili I.* Mikroservisy. Ot arkhitektury do reliza [Microservices. From architecture to release]. Saint Petersburg: Piter, 2023.
22. *Baqais A.A.B.* A Multi-view Comparison of Various Metaheuristic and Soft Computing Algorithms, *I.J. Mathematical Sciences and Computing*, 2017, 13 (4), pp. 8-19.
23. *Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gusev N.Y., Semushina N.S.* Integrated approach to the solution of computer-aided design problems, *Proceedings of the 4th International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'19). Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham, 2020, Vol. 1156, pp. 465-476.
24. *Gladkov L.A., Gladkova N.V., Leiba S.N., Strakhov N.E.* Development and research of the hybrid approach to the solution of optimization design problems, *Advances in Intelligent Systems and Computing, V. 875. International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry IITI'18*. Springer Nature Switzerland AG, 2019, Vol. 2, pp. 246-257.

Береза Денис Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: dbereza@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; аспирант.

Гладков Леонид Анатольевич – Южный федеральный университет; e-mail: lagladkov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; профессор.

Гладкова Надежда Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; старший преподаватель.

Bereza Denis Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: dbereza@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; postgraduate student.

Gladkov Leonid Anatol'evich – Southern Federal University; e-mail: lagladkov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; professor.

Gladkova Nadezhda Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; senior teacher.

УДК.681.1

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-37-45

В.П. Федосов, Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад, С.В. Кучерявенко
АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ
СИГНАЛОВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КАНАЛЕ 3D WIMAX НА ОСНОВЕ
ПРИНЦИПОВ SIMO-OFDM

Развитие телекоммуникационной отрасли сосредоточено на использовании систем беспроводной широкополосной связи, позволяющих увеличить скорость передачи информации. Для решения этой задачи разработаны новые технологии с высокими передающими способностями. Ограничение спектра сигнала и замирание сигнала в зонах Френеля из-за многопутных компонентов в беспроводной системе, развернутой в городских кварталах с плотной застройкой, представляют собой значительные проблемы при проектировании систем беспроводной связи, а также появление эффекта Доплера в результате движения мобильной станции и затухание сигнала при распространении в канале в различных частотных диапазонах. Чтобы увеличить скорость и пропускную способность, можно использовать процедуру передачи и приема сигналов для формирования каналов с одним входом и несколькими выходами SIMO (Single Input Multiple Output), обеспечивающих пространственную фильтрацию при выборе пути с максимальной мощностью сигнала. В статье представлен анализ и моделирование передачи данных на основе системы SIMO беспроводного канала 3D WiMAX. Результаты сравнения обработки сигналов этим методом с использованием адаптивного алгоритма и без него, полученный по критерию максимума отношения сигнал/шум (SNR – Signal to Noise Ratio) представлены зависимостями вероятности появления битовой ошибки (BER – Bit Error Rate) от отношения сигнал/шум (SNR). В результате моделирования был сделан вывод, что для одной и той же системы вероятность ошибки чувствительна к изменению типа модуляции, иными словами, BER изменяется в соответствии с изменением вида модуляции сигнала. Также можно сделать вывод, что системы SIMO чувствительны к многопутному распространению сигнала (multipath) для одного и того же типа модуляции, а BER растет с увеличением количества приемников поскольку снижается отношение сигнал/шум SNR.

SIMO – Single Input Multiple Output; MIMO – Multiple Input – Multiple Output – MIMO; вероятность битовых ошибок BER – Bit Error Rate; OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, многопутность.

V.P. Fedosov, AL-Musawi Wisam Mohammedtaqi M. Jawad, S.V. Kucheryavenko
ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING SPATIAL-TEMPORAL SIGNALS
FOR DATA TRANSMISSION IN 3D WIMAX CHANNEL BASED
ON SIMO-OFDM PRINCIPLES

The development of the telecommunications industry is focused on the use of wireless broadband communication systems that allow increasing the speed of information transfer. New technologies with high transmission capabilities have been developed to solve this problem. Limitation of the signal spectrum and signal fading in Fresnel zones due to multipath components in a wireless system deployed in densely built-up urban areas are significant problems in the design of wireless communication systems, as well as the occurrence of the Doppler effect due to the movement of the mobile station and signal attenuation during propagation in the channel in different frequency ranges. To increase the speed and throughput, it is possible to use the procedure of transmitting and receiving signals to form channels with one input and several outputs SIMO (Single Input Multiple Output), providing spatial filtering when choosing the path with the maximum signal power. The article presents the analysis and modeling of data transmis-

sion based on the SIMO system of the 3D WiMAX wireless channel. The results of comparison of signal processing by this method with and without the adaptive algorithm, obtained by the criterion of maximum signal-to-noise ratio (SNR) are presented by the dependences of the probability of occurrence of a bit error (BER) on the signal-to-noise ratio (SNR). As a result of modeling, it was concluded that for the same system, the probability of error is sensitive to a change in the modulation type, in other words, BER changes in accordance with a change in the type of signal modulation. It can also be concluded that SIMO systems are sensitive to multipath signal propagation for the same modulation type, and BER increases with an increase in the number of receivers since the signal-to-noise ratio SNR decreases.

SIMO – Single Input Multiple Output; MIMO – Multiple Input – Multiple Output – MIMO; BER – Bit Error Rate; OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing; multipath.

Введение. Основная проблема, с которой сталкиваются системы беспроводной связи, это замирание из-за многопутного распространения, вызванное переотражениями передаваемого сигнала в городских условиях с плотной застройкой. При использовании систем с одним входом и множеством выходов (SIMO) разнесенные приемники извлекают несколько путей одного и того же сигнала, полученного из разных каналов, и применяют схемы объединения [1, 2].

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) это широко применяемый метод беспроводной связи, который делит спектр на несколько равномерно расположенных подканалов и передает часть пользовательской информации по каждому каналу параллельно и независимо друг от друга [3]. На приемной стороне сигнал на одной частоте может частично коррелировать с принятой огибающей на другой частоте из-за замираний вследствие многопутного распространения переданных сигналов. Эта корреляция обусловлена разницей во временных задержках распространения сигнала сообщения, связанных с рассеянием волн, составляющих общий сигнал [4]. Традиционное решение проблемы многолучевого распространения – сложный эквалайзер приемника, выполняющий выравнивание данных во временной или частотной области. Важным, но простым способом борьбы с многолучевым распространением является применение модуляции OFDM, которая использует относительно простую цифровую обработку сигналов [5, 6]. Разброс во времени прибытия, известный как разброс задержки, приводит к перекрытию передаваемых импульсов данных, что приводит к межсимвольным искажениям. Из-за импульсного характера канала Рэлея несколько соседних символов могут быть уничтожены во время затухания [7, 8]. Когда ортогональность между поднесущими ухудшается, это вызывает помехи между несущими, и когда принимается серия символов, между последовательными символами OFDM возникают межсимвольные искажения. На входе приемника из-за нестабильности работы синхронизирующего генератора и разницы в тактовых частотах приемника и передатчика, у принятой выборки символов сообщения возникают ошибки синхронизации [9, 10].

Сочетание методов OFDM и SIMO в одной системе повышает спектральную эффективность и надежность линии связи без увеличения мощности передачи или расширения полосы пропускания. При реализации метода доступа SIMO-OFDM в беспроводной системе связи необходимы новые подходы к синхронизации времени и частоты, выравниванию и оценке параметров канала.

Недавно сообщалось о величине ошибок синхронизации из-за несовершенной синхронизации времени [6]. Однако ошибки временной синхронизации ухудшают характеристики приемника OFDM из-за введения перекрестных помех между несущими частотами и межсимвольной интерференции. О методах восстановления синхронизации кадров сообщается в [11]. Недавно сообщалось о влиянии синхронизации кадров на систему OFDM с пилот-сигналом и об аналитической формулировке для оценки ошибки синхронизации в системе OFDM [12], где определяется влияние ошибки синхронизации на отношение сигнал/шум. Результаты производительности по частоте ошибок по битам (BER) для системы передачи OFDM с учетом совокупного влияния шума приемника, многопутного рэлеевского замирания в канале мобильной связи и ошибки синхронизации из-за несовершенной синхронизации времени представлены в [13].

В этой статье представлен аналитический подход к оценке производительности системы SIMO-OFDM с учетом влияния ошибки синхронизации тактовых частот. Результаты производительности оцениваются с использованием вероятности ошибки приема BER от величины отношения сигнал/шум в децибелах.

Модель системы SIMO-OFDM. Модель системы OFDM состоит из преобразования потоков двоичных данных в комплексные символы посредством модуляции. Затем данные передаются в кадрах посредством последовательно-параллельного преобразования. Служебные пилотные символы вставляются в каждый кадр данных, который модулируется поднесущими посредством ОДПФ (обратного дискретного преобразования Фурье). Эти пилот-символы вставляются для синхронизации передачи символов сообщения в канале. ОДПФ используется для преобразования последовательности спектральных данных $X(k)$ в сигнал во временной области $x(n)$ следующим образом:

$$x(n) = \text{ОДПФ}_N\{X(k)\} = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (1)$$

где N – размерность преобразования Фурье и количество поднесущих.

Далее один защитный интервал вставляется между каждыми двумя символами OFDM, чтобы устранить межсимвольную интерференцию (ISI). Это защитное время включает в себя циклически расширенную часть символа OFDM, чтобы сохранить ортогональность и устранить помехи между несущими (ICI) [14].

Таким образом, для системы OFDM, содержащей M поднесущих, которые занимают полосу пропускания B , каждый символ OFDM передается во времени T . Каждые две соседние поднесущие расположены на расстоянии $\delta f = 1$. Выходной сигнал OFDM преобразуется в последовательный сигнал с помощью параллельно-последовательного преобразователя. Процесс белого гауссовского шума $(0, \sigma_w^2)$ со спектральной плотностью мощности $N_0/2$ добавляется через частотно-избирательный канал с изменяющимся во времени многопутным замиранием.

В среде распространения также может присутствовать импульсный шум, и тогда канал становится нелинейным с негауссовым импульсным шумом. Импульсный шум может существенно влиять на производительность системы связи OFDM по многим причинам. Во-первых, время прихода импульса непредсказуемо, формы импульсов неизвестны и значительно различаются. Более того, импульсы обычно имеют очень большие пиковые значения и, следовательно, большую энергию, которая может значительно превосходить энергию полезного сигнала [15] и уменьшать отношение сигнал/шум.

Импульсный шум моделируется как процесс Бернулли-Гаусса и генерируется с помощью функции процесса Бернулли-Гаусса, как объединение случайного процесса с гауссовым распределением $w(n)$ и случайного процесса $\lambda(n)$ с законом вероятности [16]:

$$P_r(\lambda(n)) = \begin{cases} p, & \lambda = 1 \\ 1 - p, & \lambda = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где λ – случайная величина в виде единичного импульса, p – вероятность появления случайного единичного импульса, n – размерность анализируемой последовательности импульса.

В приемнике, после удаления защитного интервала, дискретный базовый OFDM-сигнал для системы, включающей импульсный шум, равен:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) H(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn} + w(n) + \lambda(n), \quad 0, \dots, N-1, \quad (3)$$

где последовательность $y(n)$ – является выборкой принимаемого сигнала во временной области, $H(k) = \text{ОДПФ}(n)$ – частотная характеристика канала на k -х частотах. Сумма составляющих гауссовского шума и импульсного шума составляет общий шум, определяемый выражением $z(n) = w(n) + \lambda(n)$.

Пусть Ω_P подмножество N_P пилотных поднесущих и Δ_P – пилот-интервал в частотной области. По этому подмножеству можно оценить частотную характеристику канала, а затем интерполировать ее по другим поднесущим $(N - N_P)$. Систему OFDM можно выразить как

$$y(n) = y^P(n) + y^D(n) + z(n) \quad (4)$$

$$y(n) = \sum_{k \in \{\Omega_p\}} X^P(k) H(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn} + \sum_{k \in \{\Omega_p\}} X^D(k) H(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn} + z(n), \quad (5)$$

где $X^P(k)$ и $X^D(k)$ представляют собой комплексный пилот-сигнал и символ данных соответственно, передаваемые на k -ой частоте. Вставка пилот-сигнала в поднесущие каждого символа OFDM должна удовлетворять требованиям теории выборки и равномерного распределения [17].

После прямого дискретного преобразования Фурье ДПФ выборка $X(n)$ становится равна:

$$X(n) = \text{ДПФ}_N\{y(k)\} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (6)$$

Эта выборка является результатом частотно-временного выравнивания в каналах приемной системы.

Импульсную характеристику модели канала распространения с частотно-селективным замиранием, можно записать как:

$$h(\tau, t) = \sum_{i=0}^{L-1} h_i(t) \delta(t - \tau_i), \quad (7)$$

где $h_i(t)$ – импульсная характеристика, представляющая комплексное затухание канала, τ_i – случайная задержка на выбранном пути распространения, L – количество путей распространения.

На рис. 1 представлена схема модели системы SIMO-OFDM с N_R приемными антеннами. В передатчике поток данных делится на блоки длиной N в формирователе блоков (ФБ). Для каждого блока применяется обратное преобразование Фурье (ОДПФ) для преобразования данных во временную область. Затем к каждому блоку добавляется циклический префикс (ЦПР). Потом блоки временной области последовательно передаются по каналу с многопутным распространением, избирательному по времени и частоте. В приемнике циклический префикс удаляется и выполняется коррекция во временной или частотной области, а также прямое преобразование Фурье ДПФ для извлечения переданных блоков.

В структуре модели системы блок эквалайзера (Э) выполняет коррекцию во временной или частотной области, также учитывается добавление шума канала распространения $z(n)$ [17].

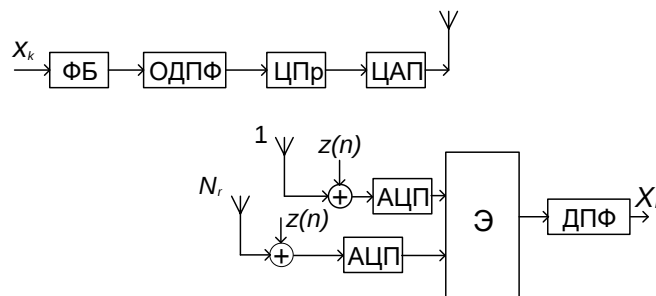


Рис. 1. Модель системы SIMO-OFDM

В рассматриваемой системе SIMO-OFDM расположение приемных антенн разнесено в пространстве, например, на мачте приемные антенны закреплены на расстоянии в несколько метров друг от друга. Это сделано с целью приема одного и того же сигнала сообщения с разных путей с дальнейшим выбором принятого сигнала с максимальным соотношением сигнал/шум, что обеспечивает большую производительность и помехоустойчивость системы.

Представляет интерес результат применения различных типов модуляции совместно с разработанным адаптивным алгоритмом пространственно-временной обработки сигналов [2, 4, 5] для системы SIMO-OFDM.

Результаты моделирования. Компьютерное моделирование использовано для оценки эффективности применения адаптивного алгоритма пространственно-временной обработки для разных типов модуляции переданного сигнала.

Для передающей системы базовой станции и приемных систем мобильной станции была выбрана несущая частота 2,5 ГГц, обеспечивающая умеренное затухание сигнала для выбранного диапазона беспроводной связи. Расстояние и координаты расположения базовой и мобильных станций выбираются исходя из предполагаемой работы системы связи на корпусной мачте высотой 90 м и удаленности передающей и принимающих антенн в 20 км при условиях городской застройки для 3D-модели канала [18].

Предполагается, что базовая станция неподвижна и находится в фиксированном положении, в то время как мобильная станция движется с постоянной скоростью $V = 40$ км/ч.

На рис. 2 показана зависимость уменьшения вероятности ошибочного приема BER символов сигнала сообщения от величины отношения сигнал/шум принятого сигнала для исследованных типов модуляции BPSK (Binary Phase-Shift Keying – двоичная фазовая модуляция), QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying – квадратурная фазовая модуляция), 8-PSK (8 - Phase-Shift Keying – восьмеричная фазовая модуляция), 16-QAM (16 - Quadrature Amplitude Modulation – шестнадцатеричная квадратурная модуляция).

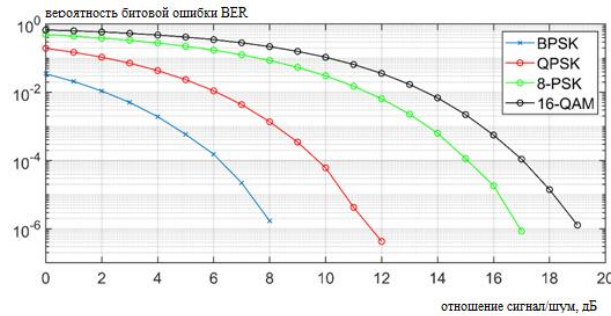


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для системы SIMO-OFDM без использования адаптивного алгоритма при различных типах модуляции

На рис. 3 показана зависимость уменьшения вероятности ошибочного приема BER от величины отношения сигнал/шум принятого сигнала для тех же типов модуляции, но исследование проведено с применением адаптивного алгоритма пространственно-временной обработки сигналов.

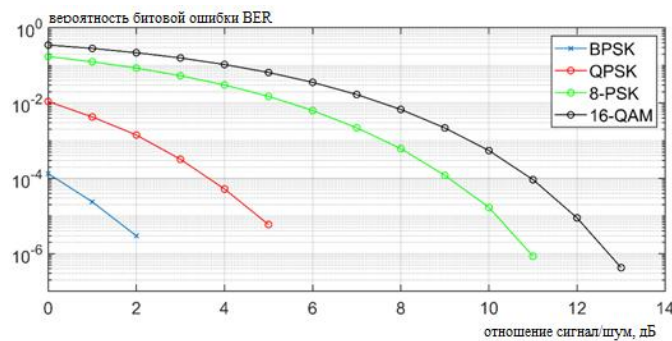


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для системы SIMO-OFDM с использованием адаптивного алгоритма при различных типах модуляции

Полученные результаты возникновения битовой ошибки при фиксированном значении отношения сигнал/шум в 2 дБ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значение вероятности битовой ошибки при различных типах модуляции для системы SIMO-OFDM

модуляция \ алгоритм	BPSK	QPSK	8-PSK	16-QAM
без адаптивного алгоритма	10^{-2}	10^{-1}	4	6
с адаптивным алгоритмом	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-2}$	2,5

Результаты, представленные в табл. 1, показывают, что для системы SIMO-OFDM существенное уменьшение вероятности появления битовой ошибки получается при применении модуляции BPSK совместно с алгоритмом адаптации или без него. Минимальное значение вероятности битовой ошибки получается при совместном применении алгоритма адаптации и типа модуляции BPSK.

Самое большое значение вероятности битовой ошибки получено при анализе применения типа модуляции 16-QAM.

Для всех исследованных типов модуляции вероятность битовой ошибки BER в передаваемом сообщении существенно снижается при использовании алгоритма адаптации.

Заключение. В этой статье проведены анализ и моделирование передачи данных на основе системы SIMO-OFDM беспроводного канала 3D WiMAX с применением алгоритма адаптации для различных типов модуляции.

Результат моделирования показал, что вероятность битовой ошибки при приеме сигналов чувствительна к изменению типа модуляции для одной и той же системы, вероятность битовой ошибки изменяется из-за изменений в типе модуляции. При использовании алгоритма адаптивной обработки в SIMO-OFDM, вероятность битовой ошибки снижается для всех типов модуляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Roy R.K., Roy T.K. Evaluation of Antenna Receive Diversity Performance of SIMO-OFDM System over Rayleigh Fading Channel // Computer Science and Applications. – 2013. – 4 (7).
2. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO-OFDM technique // Conference Proceedings - 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2017. – 2017. – P. 218-221.
3. Sadjadpour H.R. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) // Handbook of Radio Frequency and Wireless Technologies. – Elsevier, 2004. – P. 333-353.
4. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model // Book Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model. – IEEE, 2021. – P. 443-446.
5. Федосов В.П., Аль-Мусауи Вусам Мохаммедтаки М. Джавад. Анализ и сравнение адаптивного алгоритма в системах SISO и MIMO для канала 3D-WiMAX в условиях функционирования беспилотных летательных средств в районе с плотной застройкой // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2023): Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Т. 1. – Таганрог, 2023. – С. 50-56.
6. Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S. Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles // Book Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles. – IOP Publishing, 2021. – P. 012131.
7. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Theoretical Analysis of Adaptive Algorithm Modulation Scheme in 3D OFDM WiMAX System // Trends in Sciences. – 2022. – No. 19.12. – P. 4605-4605.
8. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm for wireless data transmission (including images) based on SISO system and OFDM technique // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 15, No. 3. – P. 353-364.

9. Джамил Д.С. Передача информации на основе канала MIMO-OFDM 3D WiMAX с использованием адаптивного алгоритма // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов. – Томск, 2021. – С. 107-112.
10. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Data transmission in 3D WIMAX channel based on SISO-OFDM and MIMO-OFDM // Izvestiya SFedU. Technical science. – 2020. – No. 6 (216). – P. 6-18. (In Russian).
11. Fedosov V., Al-Musawi W., Kucheryavenko S. Transmission Data in 3D Channel Using Adaptive Algorithm Based on The MIMO-OFDM in a Densely Built-Up Area // in 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2023). – 2023. – P. 240-243.
12. Федосов В.П., Терновой Д.О. Алгоритм совместной адаптации на прием и передачу в системе связи на основе антенных решеток // Радиотехника. – 2011. – № 9. – С. 52-55.
13. Федосов В.П., Ковтун Д.Г., Лegin А.А., Ломакина А.В. Исследование модели OFDM-сигнала с малым уровнем внеполосного излучения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 11 (172). – С. 6-16.
14. Федосов В.П., Муравицкий Н.С. Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в МIMO-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8 (171). – С. 35-43.
15. Федосов В.П., Джамил Д.С., Кучерявенко С.В. Сравнение производительностей адаптивного алгоритма и метода минимума среднеквадратического отклонения для передачи изображений на основе систем связи с использованием антенных решеток // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 2. – С. 69-78.
16. Finamore W.A., da Silva Pinho M., Sharma M., Ribeiro M.V. Modeling Noise as a Bernoulli-Gaussian Process // Journal of Communication and Information Systems. – 2023. – 38, (1). – P. 174-186.
17. Beheshti M., Omid M.J., Doost-Hoseini A.M. Equalisation of SIMO-OFDM systems with insufficient cyclic prefix in doubly selective channels // IET Commun. – 2009. – Vol. 3, Issue 12. – P. 1870-1882.
18. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9. Ocean Sensing and Monitoring IX. 2017. – P. 101860W.
19. Федосов В.П., Емельяненко А.В. Сравнительная эффективность беспроводного доступа на основе пространственной адаптации на выходах антенной решетки при использовании MIMO OFDM в релейском канале // Антенны. – 2013. – № 10 (197). – С. 045-049.
20. Федосов В.П., Кучерявенко С.В., Муравицкий Н.С. Повышение эффективности радиосвязи в релейском канале на основе антенных решеток // Антенны. – 2008. – № 11 (138). – С. 98-104.
21. Федосов В.П., Аль-Мусауи Висам Мохаммедтаки М. Джавад, Кучерявенко С.В. Пространственно-временной адаптивный алгоритм с использованием кода Хэмминга на основе модели беспроводного канала 3D-MIMO // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 2. – С. 113-123.
22. Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S. Medical Image Transmission in 3D WiMAX Channel Using Adaptive Algorithm Based on MIMO-OFDM Principles // Conference Proceedings - 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2023. – 2023. – P. 236-239.
23. Fedosov V., Lomakina A., Legin A., Voronin V. Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels // Book Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels. International Society for Optics and Photonics. – 2016. – P. 98720G.
24. Kucheryavenko A., Fedosov V. Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MATLAB // MATEC Web of Conferences. – 2017. – P. 05008.
25. Fedosov V., Legin A. Wireless Data Transmission in Underwater Hydroacoustic Environment Based on MIMO-OFDM System and Application Adaptive Algorithm at the Receiver Side // Serbian journal of electrical engineering. – February 2019. – Vol. 16, No. 1. – P. 71-83.

REFERENCES

1. Roy R.K., Roy T.K. Evaluation of Antenna Receive Diversity Performance of SIMO-OFDM System over Rayleigh Fading Channel, *Computer Science and Applications*, 2013, 4 (7).
2. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO-OFDM technique, *Conference Proceedings - 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2017*, 2017, pp. 218-221.
3. Sadjadpour H.R. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), *Handbook of Radio Frequency and Wireless Technologies*. Elsevier, 2004, pp. 333-353.
4. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model, *Book Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model*. IEEE, 2021, pp. 443-446.

5. Fedosov V.P., Al'-Musavi Visam Mokhammedtaki M. Dzhavad. Analiz i sravnenie adaptivnogo algoritma v sistemakh SISO i MIMO dlya kanala 3D-WiMAX v usloviyakh funktsionirovaniya bespilotnykh letatel'nykh sredstv v rayone s plotnoy zastroykoy [Analysis and comparison of adaptive algorithm in SISO and MIMO systems for 3D-WiMAX channel under conditions of unmanned aerial vehicles operation in densely populated areas], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii (KomTekh-2023): Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Computer and information technologies in science, engineering and management (KomTech-2023). Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation], Vol. 1. Taganrog, 2023, pp. 50-56.
6. Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S. Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles, *Book Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles*. IOP Publishing, 2021, pp. 012131.
7. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Theoretical Analysis of Adaptive Algorithm Modulation Scheme in 3D OFDM WiMAX System, *Trends in Sciences*, 2022, No. 19.12, pp. 4605-4605.
8. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm for wireless data transmission (including images) based on SISO system and OFDM technique, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 353-364.
9. Dzhamil D.S. Peredacha informatsii na osnove kanala MIMO-OFDM 3D WiMAX s ispol'zovaniem adaptivnogo algoritma [Information transmission based on MIMO-OFDM 3D WiMAX channel using adaptive algorithm], *Nauchnaya initsiativa inostrannykh studentov i aspirantov* [Scientific initiative of foreign students and postgraduates]. Tomsk, 2021, pp. 107-112.
10. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Data transmission in 3D WIMAX channel based on SISO-OFDM and MIMO-OFDM, *Izvestiya SFedU. Technical science*, 2020 No. 6 (216), pp. 6-18. (In Russian).
11. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Data transmission in 3D WIMAX channel based on SISO-OFDM and MIMO-OFDM, *Izvestiya SFedU. Technical science*, 2020, No. 6 (216), pp. 6-18. Fedosov V., Al-Musawi W., Kucheryavenko S. Transmission Data in 3D Channel Using Adaptive Algorithm Based on The MIMO-OFDM in a Densely Built-Up Area, in *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2023)*, 2023, pp. 240-243.
12. Fedosov, V.P., Ternovoy, D.O. Algoritm sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennykh reshetok [Algorithm for joint adaptation for reception and transmission in a communication system based on antenna arrays], *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering], 2011, No. 9, pp. 52-55.
13. Fedosov V.P., Kovtun D.G., Legin A.A., Lomakina A.V. Issledovanie modeli OFDM-signalov s malym urovnem vnepolosnogo izlucheniya [Study of an OFDM signal model with a low level of out-of-band radiation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 11 (172), pp. 6-16.
14. Fedosov V.P., Muravitskiy N.S. Adaptivnaya priemnaya antennaya reshetka dlya obrabotki prostranstvenno-vremennyykh signalov v MIMO-sisteme besprovodnoy peredachi dannykh [Adaptive receiving antenna array for processing spatio-temporal signals in a MIMO wireless data transmission system], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 8 (171), pp. 35-43.
15. Fedosov V.P., Dzhamil D.S., Kucheryavenko S.V. Sravnenie proizvoditel'nostey adaptivnogo algoritma i metoda minimuma srednekvadracheskogo otkloneniya dlya peredachi izobrazheniy na osnove sistem svyazi s ispol'zovaniem antennykh reshetok [Comparison of the performance of an adaptive algorithm and a minimum mean square deviation method for image transmission based on communication systems using antenna arrays], *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering], 2023, Vol. 87, No. 2, pp. 69-78.
16. Finamore W.A., da Silva Pinho M., Sharma M., Ribeiro M.V. Modeling Noise as a Bernoulli-Gaussian Process, *Journal of Communication and Information Systems*, 2023, 38, (1), pp. 174-186.
17. Beheshti M., Omid M.J., Doost-Hoseini A.M. Equalisation of SIMO-OFDM systems with insufficient cyclic prefix in doubly selective channels, *IET Commun*, 2009, Vol. 3, Issue 12, pp. 1870-1882.
18. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9. Ocean Sensing and Monitoring IX. 2017*, pp. 101860W.
19. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Sravnitel'naya effektivnost' besprovodnogo dostupa na osnove prostranstvennoy adaptatsii na vykhodakh antennoy reshetki pri ispol'zovanii MIMO OFDM v releevskom kanale [Comparative efficiency of wireless access based on spatial adaptation at the outputs of the antenna array using MIMO OFDM in the Rayleigh channel], *Antenny* [Antennas], 2013, No. 10 (197), pp. 045-049.
20. Fedosov V.P., Kucheryavenko S.V., Muravitskiy N.S. Povyshenie effektivnosti radiosvyazi v releevskom kanale na osnove antennykh reshetok [Increasing the efficiency of radio communication in the Rayleigh channel based on antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 2008, No. 11 (138), pp. 98-104.

21. Fedosov V.P., Al'-Musavi Visam Mokhammedtaki M. Dzhavad, Kucheryavenko S.V. Prostranstvenno-vremennoy adaptivnyy algoritm s ispol'zovaniem koda KHamminga na osnove modeli besprovodnogo kanala 3D-MIMO [Spatio-temporal adaptive algorithm using the Hamming code based on the 3D-MIMO wireless channel model], *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering], 2024, Vol. 88, No. 2, pp. 113-123.
22. Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S. Medical Image Transmission in 3D WiMAX Channel Using Adaptive Algorithm Based on MIMO-OFDM Principles, *Conference Proceedings - 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2023*, 2023, pp. 236-239.
23. Fedosov V., Lomakina A., Legin A., Voronin V. Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels, *Book Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels. International Society for Optics and Photonics*, 2016, pp. 98720G.
24. Kucheryavenko A., Fedosov V. Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MATLAB, *MATEC Web of Conferences*, 2017, pp. 05008.
25. Fedosov V., Legin A. Wireless Data Transmission in Underwater Hydroacoustic Environment Based on MIMO-OFDM System and Application Adaptive Algorithm at the Receiver Side, *Serbian journal of electrical engineering*, February 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 71-83.

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; профессор.

Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад – Южный федеральный университет; e-mail: almusavi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Кучерявенко Светлана Валентиновна – Южный федеральный университет; e-mail: svkucheryavenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; доцент.

Fedosov Valentin Petrovich – Southern Federal University; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; professor.

Al-Musawi Wisam Mohammedtaqi M. Jawad – Southern Federal University; e-mail: almusavi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; postgraduate student.

Kucheryavenko Svetlana Valentinovna – Southern Federal University; e-mail: svkucheryavenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; associate professor.

УДК 004.832.23

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-45-56

С.И. Родзин, А.И. Дерменжи

ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЙ В ПОПУЛЯЦИОННЫХ АЛГОРИТМАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МЕТРОПОЛИСА–ГАСТИНГСА

Наиболее важными задачами принятия оптимальных решений с использованием эвристических алгоритмов считаются повышение точности и предотвращение преждевременной сходимости. Большинство исследований в этом направлении сосредоточено на разработке новых операторов, настройке параметров популяционной метаэвристики и гибридизации нескольких стратегий поиска решений. Гораздо меньше внимания уделяется инициализации – важной операции в популяционных алгоритмах, которая связана с созданием исходной популяции решений. Предлагается новый подход к инициализации популяции для эвристических алгоритмов. При формировании множества начальных решений предлагается использовать метод Метрополиса–Гастингса. В соответствии с этим методом исходные решения в популяции принимают значения, близкие к глобальному или локальным оптимумам целевой функции. Это позволяет повысить точность получаемых решений. Чтобы продемонстрировать возможности предлагаемого подхода к инициализации, он был встроен в базовый алгоритм дифференциальной эволюции. Для оценки эффективности стратегии проведена экспериментальная проверка путем сравнения с такими известными методами как случайная инициализация, обучение на основе методов оппозиции и хаоса, а также метода диагонального равномерного распределения. Сравнение проводилось на репрезен-

тативном наборе мультимодальных, унимодальных и гибридных функций, включая функцию Расстригина, Квинга, Розенброка, Швевеля, квинтовую, ступенчатую, сферическую. Анализировались скорость сходимости алгоритмов и точность получаемых решений. В качестве показателей сравнения использовались среднее значение по лучшим решениям, медианное лучшее решение, стандартное отклонение от лучшего решения, количество вызовов функций, коэффициент успешности, коэффициент ускорения. Значения показателей усреднялись по результатам 30 отдельных запусков каждого алгоритма. Предлагаемый алгоритм работает быстрее, показывает лучшую сходимость и точность. Алгоритм дает лучшие результаты, поскольку стратегия инициализации позволяет выбирать перспективные решения, близкие к локальным или глобальным оптимумам. Статистическая проверка результатов работы алгоритмов по критерию Фридмана подтвердила, что предлагаемый подход к инициализации популяции решений обеспечивает лучший баланс скорости сходимости/точность решений.

Метаэвристика; глобальная оптимизация; дифференциальная эволюция; инициализация популяции; агент; многомерная функция; метод Метрополиса–Гастингса; критерий Фридмана.

S.I. Rodzin, A.I. Dermenzhi

INITIALIZATION OF SOLUTIONS IN POPULATION METAHEURISTICS BASED ON THE METROPOLIS–HASTINGS METHOD

The most important tasks of making optimal decisions using heuristic algorithms are considered to be improving accuracy and preventing premature convergence. Most of the research in this area focuses on the development of new operators, tuning the parameters of population metaheuristics, and hybridization of several solution search strategies. Much less attention is paid to initialization, an important operation in population algorithms that involves creating an initial population of solutions. A new approach to population initialization for heuristic algorithms is proposed. When forming a set of initial solutions, it is proposed to use the Metropolis–Hastings method. According to this method, the initial solutions in the population take values close to the global or local optima of the objective function. This makes it possible to increase the accuracy of the solutions obtained. To demonstrate the possibilities of the proposed initialization approach, it was integrated into the basic differential evolution algorithm. To assess the effectiveness of the strategy, an experimental test was carried out by comparing it with such well-known methods as random initialization, training based on opposition and chaos methods, as well as the method of diagonal uniform distribution. The comparison was carried out on a representative set of multimodal, unimodal, and hybrid functions, including Rastrigin, Quing, Rosenbrock, Schwefel, quintal, step, and spherical functions. The convergence rate of the algorithms and the accuracy of the obtained solutions were analyzed. The average value for the best solutions, the median best solution, the standard deviation from the best solution, the number of function calls, the success rate, and the acceleration coefficient were used as comparison indicators. The values of the indicators were averaged based on the results of 30 separate runs of each algorithm. The proposed algorithm works faster, shows better convergence and accuracy. The algorithm gives the best results because the initialization strategy allows you to choose promising solutions that are close to local or global optima. Statistical verification of the results of the algorithms using the Friedman criterion confirmed that the proposed approach to initializing a population of solutions provides a better balance of convergence rate/accuracy of solutions.

Metaheuristics; global optimization; differential evolution; population initialization; agent; multi-dimensional function; Metropolis–Hastings method; Friedman criterion.

Введение. Главное преимущество классических методов оптимизации заключается в том, что они гарантируют нахождение наилучшего из возможных решений задачи оптимизации. Однако их использование ограничено такими требованиями к оптимизируемой функции как дифференцируемость и унимодальность.

Альтернативой классическим методам оптимизации являются алгоритмы, основанные на стохастических принципах с использованием популяции поисковых агентов, которые выступают в качестве возможных решений. Целевая функция оптимизации оценивает пригодность каждого возможного решения. Алгоритмы, использующие эвристические правила для генерации шаблонов поиска, дают лучшие результаты, чем классические подходы, с точки зрения скорости, надежности и точности. Эвристические правила, обычно, соответствуют моделям, инспирированным природными механизмами и системами [1].

На вопрос о существовании эвристического алгоритма, который дает всегда лучшие результаты для задач принятия оптимальных решений давно дан отрицательный ответ – такого лучшего алгоритма не существует. Согласно *NFL*-теореме не существует эвристического алгоритма (поиска или оптимизации), который "работает" лучше других на всем множестве задач [2]. Теорема утверждает, что любые два эвристических алгоритма оптимизации эквивалентны, если их производительность усредняется по всем возможным задачам. Если некоторый алгоритм работает лучше (быстрее, точнее) на одних задачах, значит, на других задачах он будет хуже. Из *NFL*-теоремы следует, что алгоритмы имеют различную эффективность при решении разных задач.

В последнее время в литературе было предложено много эвристических алгоритмов. Среди них наиболее популярными и часто цитируемыми алгоритмами являются дифференциальная эволюция (*DE*), генетический алгоритм (*GA*), искусственная иммунная система (*AIS*), гравитационный поиск (*GSA*), имитация отжига (*SA*), колония социальных пауков (*SSO*), роя частиц (*PSO*), саранчи (*LSA*), колония муравьев (*ACO*), пчел (*ABC*), пауков (*SCA*) поиск кукушки (*CS*) [3].

Основной особенностью этих популяционных алгоритмов является относительно невысокая вычислительная сложность, поскольку поиск может быть реализован с помощью нескольких операций в условиях нелинейности и мультимодальности целевых функций. Это мотивировало использование алгоритма *DE* для решения многих практических задач, включая машинное обучение, инженеррию и финансы [4]. В частности, при проектировании аэродинамических форм самолетов алгоритм *DE* эффективно оптимизирует параметры профиля крыла; при обучении нейронных сетей оптимизирует веса и смещения сети, чтобы модель точно отражала закономерности в данных; при разработке моделей поведения неигровых персонажей *DE* совершенствует принятие решений для создания сложных и динамичных противников.

За последние два десятилетия предложено несколько модификаций алгоритма *DE* с целью улучшения его поисковых возможностей [5]. Хотя модификации *DE* обладают лучшими характеристиками, чем оригинальный *DE*, в данном исследовании он был выбран в качестве базового алгоритма для совместимости с другими публикациями.

Основными недостатками эвристических алгоритмов являются преждевременная сходимость и длительное время вычислений, особенно когда область поиска трудно исследовать. Поэтому двумя наиболее важными задачами эвристической оптимизации считаются повышение точности и предотвращение преждевременной сходимости. Причем большая часть исследований в этом направлении сосредоточена на разработке новых операторов, настройке параметров алгоритмов и сочетании нескольких стратегий поиска [1]. Гораздо меньше внимания уделяется инициализации – важной операции, которая связана с созданием исходной популяции решений. При отсутствии информации о целевой функции наиболее распространенным способом инициализации является генерация случайных решений в пределах допустимого диапазона при том, что соответствующая инициализация возможных решений могла бы повысить точность, увеличить скорость сходимости, избегая застревания в локальных оптимумах. Тем не менее в этом направлении было предпринято несколько попыток.

В [6] исходная популяция решений создается с использованием последовательности равномерно распределенных квазислучайных точек, а не псевдослучайных чисел. В [7] представлен подход, основанный на создании двух оппозиционных популяций. В [8] предложена концепция адаптивной случайности, когда новое решение добавляется к исходной популяции только в том случае, если оно не слишком близко к остальным, уже содержащимся в исходной популяции. В [9] представлен способ инициализации, основанный на хаотических последовательностях.

Целью инициализации является выбор перспективных решений. Однако большинство методов инициализации, генерирующих решения с использованием случайных и хаотических принципов, тем не менее, зачастую приводят к получению решений, близких друг к другу, оставляя в стороне значительные неисследованные участки пространства поиска. С другой стороны, оппозиционные подходы, которые приводят к получению равноудаленных решений, как правило, образуют разрозненную популяцию вдали от перспективных регионов, что увеличивает число итераций алгоритма и снижает скорость сходимости.

Необходим подход к инициализации, позволяющий генерировать перспективные решения, тем самым повышая производительность эвристического алгоритма. Воспользуемся для этих целей методом Метрополиса–Гастингса (*МН*) [10]. Он позволяет генерировать популяцию решений таким образом, чтобы перспективное значение целевой функции $f(x)$ соответствовало высокой вероятности выбора решения x . Основная идея метода *МН* заключается в том, чтобы производить частую выборку решений x с перспективным значением $f(x)$, избегая выборки из неперспективных областей.

В статье предлагается новый подход к инициализации популяции с использованием метода *МН*. Подход позволяет формировать исходную популяцию из наиболее перспективных областей пространства поиска глобального оптимума, что существенно сокращает число требуемых итераций и ускоряет сходимость алгоритма. Возможности подхода к инициализации с использованием метода *МН* иллюстрируются на примере базового алгоритма дифференциальной эволюции и репрезентативного множества тестовых функций. Экспериментальные результаты показывают, что предложенный подход обеспечивает лучшую скорость сходимости и повышает точность решения по сравнению с другими методами инициализации в популяционных алгоритмах.

Метод Метрополиса–Гастингса. Метод *МН* соответствует методу Монте-Карло и основан на создании цепи Маркова, в которой на каждом шаге генерация случайного значения x^{k+1} из функции $f(x)$ зависит только от предыдущего значения x^k . С помощью вероятностного механизма выбранное значение принимается или отклоняется. Принятие или отклонение выбранного значения зависит от следующих обстоятельств.

Предположим, что нам нужно выполнить выборку переменных из функции $f(x)$, где x соответствует некоторому значению $f(x)$ в d -мерном пространстве. Затем в два этапа осуществляется переход цепи Маркова из состояния x^k в новое состояние x^{k+1} . Вначале выбирается значение-кандидат y путем агрегирования текущего x^k со случайным значением, полученным по закону нормального распределения $N(0, 1)$. После формирования выборки кандидатов используется вероятностный механизм для решения о том, принимается y или нет в качестве нового значения x^{k+1} .

Вероятность принятия выбранного значения-кандидата y зависит от следующего соотношения:

$$\alpha(x^k, y) = \min \left\{ \frac{f(y)}{f(x^k)}, 1 \right\}. \quad (1)$$

В соответствии с этим вероятностным правилом генерируется случайное равномерно распределенное на интервале $(0, 1)$ число r . Если $r < \alpha$, то выборка y принимается в качестве нового состояния x^{k+1} , в противном случае, y отбрасывается и x^k остается в качестве нового состояния x^{k+1} .

В методе *МН* точка x с большим значением $f(x)$, имеет более высокую вероятность быть выбранной. Основная идея *МН* заключается в том, чтобы производить частую выборку перспективных точек x , избегая выборки областей с низким значением $f(x)$. Теоретическое объяснение и доказательство этого эффекта можно найти в [11].

Проиллюстрируем результаты выборки методом *МН* на примере следующей функции:

$$f(x) = \frac{1}{0,4\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0,32}} + \frac{1}{0,2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x+2,5)^2}{0,08}} + \frac{1}{0,2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-2,5)^2}{0,32}}. \quad (2)$$

Здесь $-4 \leq x \leq 4$, функция $f(x)$ имеет два глобальных максимума при $x = -2.5$ и $x = 2.5$ и один локальный максимум при $x = 0$. На рис. 1 представлены гистограммы выборок, полученных методом *МН*, для функции (2).

В этих результатах рассматриваются гистограммы для объема выборки 10 (рис. 1,а), для объема выборки 100 (рис. 1,б), для объема выборки 1000 (рис. 1,в) 1000 и для объема выборки 10000 (рис. 1,г). Из рис. 1,а видно, что, несмотря на небольшой объем выборки, равный 10, некоторые значения x связаны с максимальными значениями $f(x)$. По мере увеличения объема выборок, полученных с помощью *МН*, значения x , связанные с максимальными значениями $f(x)$, выбираются с более высокой частотой, согласно рис. 1,б-г.

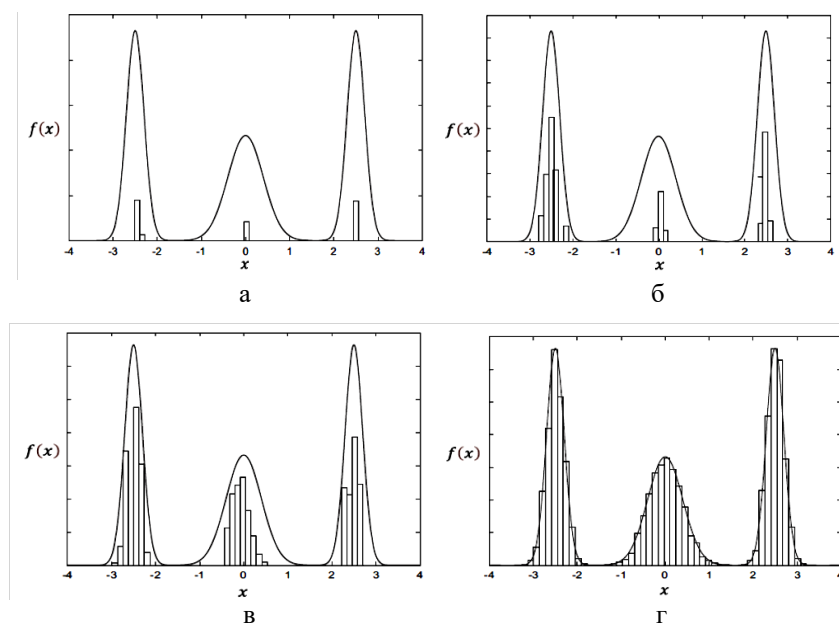


Рис. 1. Гистограммы выборок, полученных методом МН для функции $f(x)$ из уравнения (2):
а – для объема выборки 10; б – для объема выборки 100; в – для объема выборки 1000;
г – для объема выборки 10000

Базовый алгоритм дифференциальной эволюции. Алгоритм *DE*, являясь одним из наиболее цитируемых эвристических алгоритмов, имеет простую структуру, низкую вычислительную трудоемкость и неплохую сходимость [4]. Он был разработан для определения глобального решения задачи нелинейной оптимизации следующего вида:

Найти минимум функции

$$f(x), x \in D, \quad (3)$$

где D – область допустимых решений.

Популяционный алгоритм *DE* включает четыре операции: инициализацию, мутацию, кроссинговер и отбор.

На этапе инициализации случайно генерируется начальная совокупность из n агентов. На каждой итерации алгоритма операторами *DE* генерируется новое поколение агентов, причем число агентов в каждом поколении одно и то же, что является одним из параметров алгоритма.

Новое поколение агентов генерируется следующим образом. Для каждого агента v_i из предыдущего поколения случайно выбираются несколько агентов, за исключением самого v_i , и генерируется так называемый мутантный вектор. Наиболее популярными формулами для образования мутантного вектора являются следующие:

$$v = v_1 + F \cdot (v_2 - v_3), \quad (4)$$

$$v = v_1 + F \cdot (v_2 - v_3) + F \cdot (v_4 - v_5), \quad (5)$$

$$v = v_{best} + F \cdot (v_1 - v_2), \quad (6)$$

где v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 – это различные решения, случайно выбранные из текущей популяции, v_{best} – наилучшее решение в популяции, F – коэффициент масштабирования мутации (положительное вещественное число в диапазоне от 0 до 1).

Далее, над мутантным вектором v выполняется операция «скрещивания» (кроссинговер), состоящая в том, что некоторые его координаты замещаются соответствующими координатами из v_i (каждая координата замещается с некоторой вероятностью, которая также является еще одним параметром алгоритма *DE*). Полученный после скрещивания

вектор называется пробным вектором u_i . Если u_i оказывается лучше v_i (т.е. значение целевой функции стало меньше), то в новом поколении пробный вектор заменяет v_i , а в противном случае v_i остаётся без изменений.

Наконец, в *DE* используется механизм селекции для отбора лучших решений и формирования следующего поколения.

Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнут критерий останова.

Ниже представлен предлагаемый алгоритм инициализации популяции решений на основе метода *MH*.

Алгоритм инициализации популяции на основе метода *MH*. В большинстве задач оптимизации априорная информация о местоположении глобального оптимума в виде областей в пространстве решений, внутри которых – точно или приближённо – должно находиться оптимальное решение, отсутствует. Поэтому она не может быть использована для формирования исходной популяции решений близких к оптимальным значениям, что влияет на скорость сходимости алгоритма.

Псевдокод алгоритма инициализации популяции начальных решений на основе метода *MH* имеет следующий вид:

1. Ввод n, X
2. $I = \{\emptyset\}, i = 1$
3. Случайно генерируется $x_0 \in X$
4. **While** ($i \leq n$)
5. $y = x_{i-1} + N(0, 1)$
6. $\alpha = \min \left\{ \frac{f(y)}{f(x_{i-1})}, 1 \right\}$
7. Генерируется случайное равномерно распределенное на интервале $(0, 1)$ число r
8. **If** ($r < \alpha$) **then**
9. $x_i = y$
10. $I = \{I \cup x_i\}$
11. $i = i + 1$
12. **End if**
13. **End while**
14. Вывод I .

Входными данными здесь являются размер популяции n и ограничения D из области поиска X . Вначале запускается установка множества исходных решений I как пустого множества и индексной переменной $i = 1$ (строка 2). Затем случайно генерируется первое начальное значение x_0 в пространстве X (строка 3). Далее, начинается циклический процесс получения всех n исходных решений-кандидатов в популяции алгоритма (строка 4). Во-первых, создается новое решение-кандидат y путем модификации предыдущего решения x_{i-1} с помощью чисел, распределенных по нормальному закону $N(0, 1)$ (строка 5). Затем вычисляется вероятность α принятия созданного решения-кандидата y путем сравнения $f(y)$ и $f(x_{i-1})$ (строка 6). После этого генерируется случайное равномерно распределенное на интервале $(0, 1)$ число r (строка 7). Если $r < \alpha$, то в качестве нового решения x_i принимается y (строка 9), а x_i добавляется в формируемую на этапе инициализации исходную популяцию решений I , счетчик i увеличивается на единицу (строки 10-11). Процесс повторяется до тех пор, пока не будет сгенерирована вся исходная популяция из n начальных решений.

С целью демонстрации возможностей предлагаемого алгоритма инициализации популяции решений он был встроен в базовый алгоритм *DE* и проведены эксперименты.

Результаты экспериментов. В ходе экспериментов сопоставлялись результаты, полученные с помощью предлагаемого алгоритма инициализации популяции, с результатами, полученными при использовании конкурирующих подходов к инициализации, таких как случайная инициализация (*RI*) [12], обучение на основе оппозиции (*OP*) [13], метод, основанный на хаосе (*CM*) [14] и метод диагонального равномерного распределения (*DU*) [15].

Эксперименты проводились в программной среде на языке программирования C# с использованием среды программирования приложений *Microsoft Visual Studio*. Это позволило воспользоваться возможностями, предоставляемыми объектно-ориентированным подходом в разработке программного обеспечения, а также максимально использовать фреймворк *Windows Forms* (зарегистрирована программа для ЭВМ, запись № 2024690925 от 18.12.2024 г.). При отладке и тестировании использован компьютер *IBM PC* с процессором *Core i7* и ОЗУ 8 Гб.

Все конкурирующие алгоритмы инициализации также были встроены в базовый алгоритм *DE* с формулой (6) для образования мутантного вектора, с размером популяции $n = 50$ и рекомендуемыми для них наилучшими настройками таких параметров как вероятность кроссинговера $CR = 0,9$ и весовой параметр $F = 0,8$.

План экспериментов предусматривал следующие оценки:

- ♦ точность получаемых решений;
- ♦ скорость и надежность сходимости алгоритма;
- ♦ статистический анализ результатов;
- ♦ влияние размеров популяции на сходимость алгоритмов.

Существует около трех десятков различных тестовых функций оптимизации. Для экспериментов были выбраны восемь функций, включая функции Растригина, Квинга, Розенброка, Швепеля, квинтовую, ступенчатую, сферическую. Из них пять функций являются мультимодальными ($f_1(x) - f_5(x)$), две унимодальные функции ($f_6(x) - f_7(x)$) и одна гибридная функция ($f_8(x)$) [16]:

- ♦ $f_1(x) = \sum_{i=1}^d (x_i^2 - i)^2, x_i \in [-1,28; 1,28]^d, f_{min}(x^*) = 0, x^* = (0, \dots, 0);$
- ♦ $f_2(x) = \sum_{i=1}^d |x_i^5 - 3x_i^4 + 4x_i^3 + 2x_i^2 - 10x_i - 4|, x_i \in [-5,12; 5,12]^d;$
 $f_{min}(x^*) = 0, x^* = (0, \dots, 0);$
- ♦ $f_3(x) = 10d + \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)], x_i \in [-5; 10]^d;$
 $f_{min}(x^*) = 0, x^* = (0, \dots, 0);$
- ♦ $f_4(x) = \sum_{i=1}^d [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2], x_i \in [-100; 100]^d;$
 $f_{min}(x^*) = 0, x^* = (0,5, \dots, 0,5);$
- ♦ $f_5(x) = \sum_{i=1}^d |x_i^2|, x_i \in [-100; 100]^d, f_{min}(x^*) = 0, x^* = (0, \dots, 0);$
- ♦ $f_6(x) = \sum_{i=1}^d i x_i^2, x_i \in [-10; 10]^d, f_{min}(x^*) = 0, x^* = (0, \dots, 0);$
- ♦ $f_7(x) = \sum_{i=1}^d |x_i|^{i+1}, x_i \in [-1; 1]^d, f_{min}(x^*) = 0, x^* = (0, \dots, 0);$
- ♦ $f_8(x) = [10d + \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)]] + [\sum_{i=1}^d |x_i| + \sum_{i=1}^d |x_i|] + + [\sum_{i=1}^d x_i^2];$
 $x_i \in [-100; 100]^d, f_{min}(x^*) = 0, x^* = (0, \dots, 0).$

Выбор тестовых функций объясняется не только их разнообразием, но также тем, что по ним известны результаты, полученные конкурирующими алгоритмами инициализации популяций.

В этом эксперименте предполагается, что каждая функция является многомерной ($d = 30$). Показателями, по которым проводилось сравнение, являлись среднее значение по лучшим решениям (*av*), медианное лучшее решение (*med*) и стандартное отклонение от лучшего решения (*sd*). Усредненные результаты по 30 отдельным запускам каждого *DE* алгоритма, приведены в табл. 1.

Показатели *av* и *med* соответствуют точности решений, а *sd* – их дисперсии. Согласно табл. 1, алгоритм *DE-MH* дает лучшие результаты для *av* в 5 функциях из 8 и для *med* в 6 функциях из 8. Это означает, что предлагаемая стратегия инициализации обеспечивает лучшую точность примерно для 70% функций $f_1(x) - f_8(x)$.

При оценке влияния методов инициализации на скорость сходимости метаэвристического алгоритма учитывались следующие показатели: количество вызовов функций (*cf*), коэффициент успешности (*sr*) и коэффициент ускорения (*ac*).

Таблица 1

Результаты сравнения подхода к инициализации на основе *MH* с методами инициализации *RI*, *OP*, *CM*, *DU* в алгоритме *DE*

Функция		<i>DE-RI</i>	<i>DE-OP</i>	<i>DE-CM</i>	<i>DE-DU</i>	<i>DE-MH</i>
f_1	<i>av</i>	8,7512	8,6613	8,5658	8,8777	8,5263
	<i>med</i>	$2,34 \cdot 10^{-04}$	$8,61 \cdot 10^{-05}$	$1,72 \cdot 10^{-04}$	$2,08 \cdot 10^{-04}$	$1,19 \cdot 10^{-09}$
	<i>sd</i>	2,64	0,81	0,14	0,21	0,0036
f_2	<i>av</i>	1,6039	1,5732	1,5322	1,5935	1,5282
	<i>med</i>	$2,29 \cdot 10^{-04}$	$4,08 \cdot 10^{-04}$	$4,73 \cdot 10^{-04}$	$2,30 \cdot 10^{-04}$	$7,77 \cdot 10^{-05}$
	<i>sd</i>	0,0007	0,0346	0,0003	0,0007	$4,58 \cdot 10^{-05}$
f_3	<i>av</i>	31,667	30,360	31,594	31,091	30,293
	<i>med</i>	155,13	150,04	150,06	154,22	149,58
	<i>sd</i>	26,675	28,360	37,090	26,0004	18,237
f_4	<i>av</i>	10,545	10,059	11,024	7,8339	0,874
	<i>med</i>	24,793	23,807	24,400	24,004	22,888
	<i>sd</i>	14,169	15,366	14,463	13,001	10,574
f_5	<i>av</i>	-115,3	-115,8	-110,8	-114,1	-114,8
	<i>med</i>	0	0	0	0	0
	<i>sd</i>	0,2061	0,6621	0,2467	0,2011	0,8653
f_6	<i>av</i>	$5,89 \cdot 10^{-11}$	$4,23 \cdot 10^{-10}$	$9,69 \cdot 10^{-11}$	$5,57 \cdot 10^{-11}$	$7,34 \cdot 10^{-11}$
	<i>med</i>	$2,86 \cdot 10^{-14}$	$2,43 \cdot 10^{-14}$	$2,58 \cdot 10^{-14}$	$2,65 \cdot 10^{-14}$	$4,87 \cdot 10^{-15}$
	<i>sd</i>	$5,21 \cdot 10^{-14}$	$4,99 \cdot 10^{-14}$	$6,33 \cdot 10^{-14}$	$4,99 \cdot 10^{-14}$	$2,35 \cdot 10^{-14}$
f_7	<i>av</i>	$5,59 \cdot 10^{-07}$	$4,86 \cdot 10^{-07}$	$4,87 \cdot 10^{-07}$	$4,77 \cdot 10^{-07}$	$9,83 \cdot 10^{-06}$
	<i>med</i>	$5,79 \cdot 10^{-16}$	$5,77 \cdot 10^{-15}$	$3,28 \cdot 10^{-15}$	$5,55 \cdot 10^{-16}$	$3,32 \cdot 10^{-15}$
	<i>sd</i>	$3,16 \cdot 10^{-10}$	$8,94 \cdot 10^{-10}$	$4,57 \cdot 10^{-10}$	$3,83 \cdot 10^{-10}$	$3,96 \cdot 10^{-09}$
f_8	<i>av</i>	35,824	36,357	33,624	33,252	26,989
	<i>med</i>	$5,12 \cdot 10^{-07}$	$4,03 \cdot 10^{-09}$	$4,61 \cdot 10^{-07}$	$4,79 \cdot 10^{-07}$	$8,17 \cdot 10^{-09}$
	<i>sd</i>	$3,62 \cdot 10^{-07}$	$1,18 \cdot 10^{-09}$	$1,68 \cdot 10^{-07}$	$2,79 \cdot 10^{-07}$	$6,87 \cdot 10^{-09}$

Количество вызовов функций *cf* представляет собой количество обращений к целевой функции во время работы алгоритма. Значения *cf* усреднялись по результатам 30 отдельных запусков каждого *DE* алгоритма. Меньшее значение *cf* означает, что оцениваемый метод имеет лучшую скорость сходимости. Коэффициент успешности *sr* представляет собой частоту успешных выполнений алгоритма и определяется следующим образом:

$$sr = \frac{\text{Число успешных выполнений алгоритма}}{\text{Общее число запусков алгоритма}}. \quad (7)$$

Коэффициент ускорения (*ac*) сравнивает количество вызовов функций *cf* алгоритмов A_1 и A_2 следующим образом:

$$cr_{A_1/A_2} = \frac{cf_{A_1}}{cf_{A_2}}. \quad (8)$$

Если $cr_{A_1/A_2} > 1$, то это означает, что алгоритм A_2 работает быстрее, чем A_1 .

В табл. 2 представлены численные результаты показателей cf и sr для функций $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_5(x)$, $f_6(x)$, $f_7(x)$, $f_8(x)$.

Таблица 2

Результаты показателей cf и sr для функций $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_5(x)$, $f_6(x)$, $f_7(x)$, $f_8(x)$

	<i>DE-RI</i>		<i>DE-OP</i>		<i>DE-CM</i>		<i>DE-DU</i>		<i>DE-MH</i>	
	cf	sr	cf	sr	cf	sr	cf	sr	cf	sr
f_1	13,34	0,43	13,72	0,27	13,15	0,50	17,0	0,35	13,61	0,77
f_2	-	-	763,4	-	-	-	-	0,41	263,7	0,68
f_5	10,36	0,72	9,78	0,70	11,47	0,72	11,11	0,54	7,533	0,91
f_6	20,92	1	21,42	1	21,584	1	20,438	1	18,512	1
f_7	688,34	1	600,7	1	688,32	1	663,38	1	524,36	1
f_8	40,94	1	40,50	1	40,936	1	43,552	1	31,825	1

Анализ табл. 2 показывает, что на множестве тестовых функций $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_5(x)$, $f_6(x)$, $f_7(x)$, $f_8(x)$ *DE-MH* превосходит методы инициализации *DE-RI*, *DE-OP*, *DE-CM*, *DE-DU* по показателю коэффициент успешности и на множестве функций $f_2(x)$, $f_5(x)$, $f_6(x)$, $f_7(x)$, $f_8(x)$ – по показателю количество вызовов функций. Это означает, что предлагаемый метод инициализации позволяет быстрее получить результат, нежели конкурирующие методы. Несмотря на то, что показатель cf метода *DE-CM* для функции $f_1(x)$ лучше, чем *DE-MH*, однако он уступает *DE-MH* по показателю sr . Символ дефиса «-» означает, что алгоритм не смог успешно достичь решения, равного или меньшего 10^{-6} .

В табл. 3 представлены численные результаты для коэффициента ускорения cr при поиске оптимума функций $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_5(x)$, $f_6(x)$, $f_7(x)$, $f_8(x)$.

Таблица 3

Результаты показателя cr для функций $f_1(x)$, $f_5(x)$, $f_6(x)$, $f_7(x)$, $f_8(x)$ при сравнении количества вызовов функций алгоритмов *DE-RI*, *DE-OP*, *DE-CM* и *DE-DU* с алгоритмом *DE-MH*

Функция	cr			
	$cr_{DE-RI/DE-MH}$	$cr_{DE-OP/DE-MH}$	$cr_{DE-CM/DE-MH}$	$cr_{DE-DU/DE-MH}$
f_1	0,988	1,007	0,988	1,191
f_5	2,378	2,261	2,602	2,531
f_6	1,083	1,091	1,129	1,145
f_7	1,115	1,117	1,115	1,147
f_8	1,261	1,254	1,266	1,331

Из табл. 3 видно, что алгоритм *DE-MH* работает быстрее, нежели алгоритмы *DE-RI*, *DE-OP*, *DE-CM* и *DE-DU* и показывает лучшую сходимость на функциях $f_5(x)$, $f_6(x)$, $f_7(x)$, $f_8(x)$. Некоторым исключением является функция $f_1(x)$, в которой алгоритмы *DE-RI* и *DE-CM* дают несколько лучшие результаты.

Была проведена статистическая проверка результатов работы алгоритмов *DE-RI*, *DE-OP*, *DE-CM*, *DE-DU* и *DE-MH* по критерию Фридмана [17] по усредненным наилучшим значениям (av) из табл. 1. Согласно тесту Фридмана, методы ранжируются следующим образом: *DE-MH*, *DE-OP*, *DE-RI*, *DE-CM* и *DE-DU*. В соответствии с этим порядком *DE-MH* является наилучшим алгоритмом, тогда как *DE-DU* считается наихудшим подходом к инициализации. Механизмы инициализации *DE-CM*, *DE-DU*, *DE-RI* и *DE-OP* не могут одновременно увеличивать скорость сходимости и точность решений, в отличие от *DE-MH*, который обеспечивает лучший баланс скорость сходимости/точность решений.

В [18] отмечалось, что на производительность алгоритма *DE* влияет размер популяции, увеличивая количество итераций, необходимых для достижения глобального оптимума. С другой стороны, небольшое количество элементов в популяции провоцирует преждевременную сходимость [19, 20].

Были проведены эксперименты по сравнению различных подходов к инициализации с точки зрения различных размеров популяции с целью оценки точности, получаемых решений. При сравнении рассматривались тестовые функции $f_2(x)$ и $f_6(x)$. Для оценки результатов использовались показатели *av*, *med* и *sd*. Результаты усреднялись по 30 запускам алгоритмов. В табл. 4 и 5 представлены результаты для размеров популяции $n = 100$ и $n = 200$ соответственно.

Таблица 4

Результаты сравнения алгоритма инициализации на основе МН с методами инициализации RI, OP, CM, DU для функций $f_2(x)$ и $f_6(x)$ при размере популяции $n = 100$

Функция		DE-RI	DE-OP	DE-CM	DE-DU	DE-MH
f_2	<i>av</i>	2,233	3,732	2,176	2,875	2,149
	<i>med</i>	1,465	2,018	2,294	3,140	0,007
	<i>sd</i>	2,022	3,907	1,634	1,875	0,175
f_6	<i>av</i>	0,001	$2,23 \cdot 10^{-09}$	0,0010	0,0012	$5,02 \cdot 10^{-07}$
	<i>med</i>	0,002	0,0009	0,0031	0,0026	$6,21 \cdot 10^{-08}$
	<i>sd</i>	0,001	0,0004	0,0007	0,0009 ³	$3,21 \cdot 10^{-06}$

Таблица 5

Результаты сравнения алгоритма инициализации на основе МН с методами инициализации RI, OP, CM, DU для функций $f_2(x)$ и $f_6(x)$ при размере популяции $n = 200$

Функция		DE-RI	DE-OP	DE-CM	DE-DU	DE-MH
f_2	<i>av</i>	2,4682	5,5055	3,4987	3,4000	3,021
	<i>med</i>	2,145	2,232	2,897	3,191	1,617
	<i>sd</i>	2,451	4,196	2,505	2,445	0,922
f_6	<i>av</i>	1,293	1,425	0,0010	1,277	1,428
	<i>med</i>	1,647	1,801	1,600	1,600	1,366
	<i>sd</i>	1,109	1,353	1,004	1,004	1,023

Согласно табл. 4 и 5 все алгоритмы приводят к ухудшению результатов из-за увеличения размеров популяции. Тем не менее, в сравнении с другими подходами к инициализации, предлагаемый алгоритм DE-MH дает лучшие результаты, поскольку стратегия инициализации позволяет выбирать перспективные решения, близкие к локальным или глобальным оптимумам.

Заключение. Предложен новый алгоритм инициализации популяции для эвристических алгоритмов на основе метода Метрополиса–Гастингса. Стратегия инициализации позволяет выбирать перспективные решения, близкие к локальным или глобальным оптимумам. Это ускоряет сходимость популяционного алгоритма и повышает точность решений.

Для демонстрации возможностей предлагаемой стратегии инициализации она была встроена в популярный алгоритм дифференциальной эволюции. Эффективность подхода сравнивалась с другими известными методами инициализации, встроенными в алгоритм дифференциальной эволюции, такими как случайная инициализация, обучение на основе оппозиции, метод, основанный на хаосе и метод диагонального равномерного распределения. В качестве тестовых функций оптимизации были выбраны известные мультимодальные и унимодальные функции.

Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемая стратегия обеспечивает лучшую скорость сходимости и качество решений в сравнении с конкурирующими методами инициализации. Статистическая проверка результатов работы алгоритмов по критерию Фридмана подтвердила, что предлагаемый подход к инициализации популяции решений обеспечивает лучший баланс скорость сходимости/точность решений.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и ВО РФ в рамках проекта “Разработка и исследование методики интеллектуального геоинформационного моделирования транспортных процессов в условиях неполной информации”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Родзин С.И. Современное состояние биоэвристик: классификация, бенчмаркинг, области применения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 280-298.
2. Wolpert D.H., Macready W.G. No free lunch theorems for optimization // IEEE Trans. Evol. Comput. – 1997. – No. 1. – P. 67-82.
3. Dragoi E.N., Dafinescu V. Review of Metaheuristics Inspired from the Animal Kingdom // Mathematics. – 2021. – No. 9. – P. 2335.
4. Родзин С.И., Родзина О.Н. Сравнение программных реализаций эволюционных вычислений для задач многомерной оптимизации // Программная инженерия. – 2019. – Т. 10, № 11-12. – С. 451-456.
5. Tanabe R, Fukunaga A. Success-history based parameter adaptation for differential evolution // IEEE Cong. on Evol. Comp. – 2013. – P. 71-78.
6. Wen J., Ma H., Zhang X. Optimization of the occlusion strategy in visual tracking // Tsinghua Sci. Technol. – 2016. – Vol. 21 (2). – P. 221-230.
7. Rahnamayan S., et.al. A novel population initialization method for accelerating evolutionary algorithms // Comput. Math. Appl. – 2007. – Vol. 53 (10). – P. 1605-1614.
8. Pan W., et. al. Adaptive randomness: a new population initialization method // Math. problems in engineering. – 2014. – Vol. 2014. – 14 p.
9. Ahmad M., Isa N., Limb W., Ang K. Differential evolution with modified initialization scheme using chaotic oppositional based learning strategy // Jour. Al. Engin. – 2022. – Vol. 61 (12). – P. 11835-11858.
10. Chib S, Greenberg E. Understanding the Metropolis–Hastings Algorithm // Am Stat. – 1995. – Vol. 49 (4). – P. 327-335.
11. Chauveau D., Vandekerckhove P. Improving convergence of the Hastings-Metropolis algorithm with an adaptive proposal // Scand. Jour. Stat. – 2002. – Vol. 29 (1). – P. 13-29.
12. Rodzin S., Rodzina O. New computational models for big data and optimization // Proc. 9th Int. Conf. on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – 2015. – P. 3-7.
13. Rahnamayan S., Tizhoosh H., Salama M. A novel population initialization method for accelerating evolutionary algorithms // Comput. Math. Appl. – 2007. – Vol. 53 (10). – P. 1605-1614.
14. Ahmad M., Isa N., Limb W., Ang K. Differential evolution with modified initialization scheme using chaotic oppositional based learning strategy // Alexan. Engin. Jour. – 2022. – Vol. 61 (12). – P. 11835-11858.
15. Li Q., Bai Y., Gao W. Improved Initialization Method for Metaheuristic Algorithms: A Novel Search Space View // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 158508-158539.
16. Cuevas E., Escobar H., Sarkar R., Eid H. A new population initialization approach method // Applied Intelligence. – 2023. – Vol. 53. – P. 16575-16593.
17. Wang H., Wu Z., Rahnamayan S. Enhanced opposition based differential evolution for solving high-dimensional continuous optimization problems // Soft. Comput. – 2011. – Vol. 15 (11). – P. 2127-2140.
18. Rodzin S., Rodzina L. Theory of bionic optimization and its application to evolutionary synthesis of digital devices // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). – 2014. – P. 7027058.
19. Курейчик В.В., Родзин С.И. Биоэвристики, инспирированные фауной (обзор) // Информационные технологии. – 2023. – Т. 29, № 11. – С. 559-573.
20. Родзин С.И., Скобцов Ю.А., Эль-Хатиб С.А. Биоэвристики: теория алгоритмы и приложения: монография. – Чебоксары: ИД "Среда", 2019. – 224 с.

REFERENCES

1. Rodzin S.I. Sovremennoe sostoyanie bioevristik: klassifikatsiya, benchmarking, oblasti primeneniya [Current state of bioheuristics: classification, benchmarking, application areas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 2, pp. 280-298.
2. Wolpert D.H., Macready W.G. No free lunch theorems for optimization, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 1997, No. 1, pp. 67-82.
3. Dragoi E.N., Dafinescu V. Review of Metaheuristics Inspired from the Animal Kingdom, *Mathematics*, 2021, No. 9, pp. 2335.
4. Rodzin S.I., Rodzina O.N. Sravnenie programmnykh realizatsiy evolyutsionnykh vychisleniy dlya zadach mnogomernoy optimizatsii [Comparison of software implementations of evolutionary computing for multidimensional optimization problems], *Programmnaya inzheneriya* [Software engineering], 2019, Vol. 10, No. 11-12, pp. 451-456.
5. Tanabe R, Fukunaga A. Success-history based parameter adaptation for differential evolution, *IEEE Cong. on Evol. Comp.*, 2013, pp. 71-78.
6. Wen J., Ma H., Zhang X. Optimization of the occlusion strategy in visual tracking, *Tsinghua Sci. Technol.*, 2016, Vol. 21 (2), pp. 221-230.
7. Rahnamayan S., et.al. A novel population initialization method for accelerating evolutionary algorithms, *Comput. Math. Appl.*, 2007, Vol. 53 (10), pp. 1605-1614.

8. Pan W., et. al. Adaptive randomness: a new population initialization method, *Math. problems in engineering*, 2014, Vol. 2014, 14 p.
9. Ahmad M., Isa N., Limb W., Ang K. Differential evolution with modified initialization scheme using chaotic oppositional based learning strategy, *Jour. Al. Engin.*, 2022, Vol. 61 (12), pp. 11835-11858.
10. Chib S., Greenberg E. Understanding the Metropolis–Hastings Algorithm, *Am Stat.*, 1995, Vol. 49 (4), pp. 327-335.
11. Chauveau D., Vandekerckhove P. Improving convergence of the Hastings-Metropolis algorithm with an adaptive proposal, *Scand. Jour. Stat.*, 2002, Vol. 29 (1), pp. 13-29.
12. Rodzin S., Rodzina O. New computational models for big data and optimization, *Proc. 9th Int. Conf. on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, 2015, pp. 3-7.
13. Rahnamayan S., Tizhoosh H., Salama M. A novel population initialization method for accelerating evolutionary algorithms, *Comput. Math. Appl.*, 2007, Vol. 53 (10), pp. 1605-1614.
14. Ahmad M., Isa N., Limb W., Ang K. Differential evolution with modified initialization scheme using chaotic oppositional based learning strategy, *Alexan. Engin. Jour.*, 2022, Vol. 61 (12), pp. 11835-11858.
15. Li Q., Bai Y., Gao W. Improved Initialization Method for Metaheuristic Algorithms: A Novel Search Space View, *IEEE Access.*, 2021, Vol. 9, pp. 158508-158539.
16. Cuevas E., Escobar H., Sarkar R., Eid H. A new population initialization approach method, *Applied Intelligence*, 2023, Vol. 53, pp. 16575-16593.
17. Wang H., Wu Z., Rahnamayan S. Enhanced opposition based differential evolution for solving high-dimensional continuous optimization problems, *Soft. Comput.*, 2011, Vol. 15 (11), pp. 2127-2140.
18. Rodzin S., Rodzina L. Theory of bionic optimization and its application to evolutionary synthesis of digital devices, *Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2014, pp. 7027058.
19. Kureychik V.V., Rodzin S.I. Bioevristiki, inspirirovannye faunoy (obzor) [Bioheuristics inspired by fauna (review)], *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2023, Vol. 29, No. 11, pp. 559-573.
20. Rodzin S.I., Skobtsov Yu.A., El'-Khatib S.A. Bioevristiki: teoriya algoritmy i prilozheniya: monografiya [Bioheuristics: theory, algorithms and applications: monograph]. Cheboksary: ID "Sreda", 2019, 224 p.

Родзин Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: srodzin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; профессор.

Дерменжи Анастасия Игоревна – ООО «Видучи»; e-mail: dermenzhi-00@mail.ru; г. Москва, Россия; генеральный директор.

Rodzin Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: srodzin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371673; the Department of Software Engineering; professor.

Dermenzhi Anastasia Igorevna – Viduchi LLC, e-mail: dermenzhi-00@mail.ru; Moscow, Russia; general manager.

УДК 004.932

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-56-65

А.В. Полтавский, Д.С. Поляниченко, Е.Р. Коломенская, М.А. Бугакова

АЛГОРИТМЫ ГЕНЕРАЦИИ И ОБРАБОТКИ SEM-ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СВОЙСТВ БИОНЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТРИЦ И МЕТОДЫ ИХ ВЕРИФИКАЦИИ

Одним из распространенных методов анализа характеристик материалов, получаемых в результате химического синтеза, является сканирующая электронная микроскопия (SEM), применение которой позволяет получить изображения с высоким разрешением и увеличением. В статье исследуются алгоритмы анализа изображений материалов, обладающих определенными свойствами (например, пористостью) – бионеорганических матриц. Пористые структуры представляют собой обширный класс материалов с широкой областью применения, включая сельское хозяйство, медицину, катализ и многое другое. Одна из важных сфер использования подобных структур – тканевая инженерия, в которой подобные каркасы необходимы для обеспечения восстановительных процессов тканей организма. И для каждого организма матрицы должны быть персонализированными, что требует выполнения трудоемкого процесса по подбору характеристик каркаса, применимого в конкретном случае. Эта задача в настоящее время частично решается применением технологий искусственного интеллекта для повышения точности или поддержки при-

нятия решения во время изготовления или анализа матрицы. Однако, часть работы в этом процессе все еще выполняется вручную и представляет из себя трудозатратную рутину для специалиста. В частности, процесс анализа SEM-изображений с целью вычисления характеристик полученного материала все еще представляет множество длительных этапов с использованием различных инструментов. При этом такие характеристики как пористость, извилистость, диффузность являются очень важным фактором для эксперта в процессе принятия решения о применимости изготовленной бионеорганической матрицы в каждом конкретном случае. Соответственно целью данного исследования является разработка комплекса алгоритмов для полностью автоматической обработки SEM-изображений. Также, исходя из поставленной цели, в рамках исследования можно выделить ряд задач: разработка алгоритмов для детекции объектов на изображении, разработка модели нейронной сети для уточнения результатов детекции, реализация алгоритмов вычисления характеристик пористого материала, а также проектирование и выполнение ряда верификационных испытаний для подтверждения качества выполненных вычислений. В результате проведенного исследования мы сделали некоторые выводы. В частности, подход, использующий генерацию синтетических данных, может существенно ускорить и упростить процесс обучения нейронной сети, а также повысить качество выходной модели. Далее мы заключили, что полученные алгоритмы могут полностью автоматизировать процесс анализа SEM-изображений с пористой структурой, а качество вычислений подтвердили с помощью ряда верификационных тестов. Полученные алгоритмы могут быть распространены на другие аналогичные задачи, связанные с проблемами анализа изображений и выявления необходимых признаков и характеристик.

SEM-изображения; пористость; выделение контуров; сегментация; диффузность; проницаемость; верификация; материалы; машинное обучение; морфология.

A.V. Poltavskiy, D.S. Polyanichenko, E.R. Kolomenskaya, M.A. Butakova

ALGORITHMS OF GENERATION AND SEM-IMAGES PROCESSING FOR PROPERTIES IDENTIFICATION OF BIOINORGANIC MATRICES AND METHODS OF THEIR VERIFICATION

Scanning electron microscopy (SEM) is one of the most common methods for analyzing the characteristics of materials obtained through chemical synthesis. The use of this method makes it possible to obtain images with high resolution and magnification. The article examines algorithms for image analysis of materials with specific properties, such as porosity – bioneorganic matrices. Scaffolds are a broad class of materials with a wide range of applications, including agriculture, medicine, catalysis, and many others. One of the important applications of such structures is tissue engineering, where such frameworks are necessary to ensure the regenerative processes of body tissues. And for each organism matrices must be personalized, which requires a laborious process of selecting the characteristics of the framework applicable in a particular case. This task is currently partially solved by the application of artificial intelligence technologies to improve accuracy or support decision making during matrix fabrication or analysis. However, some of the work in this process is still manual and represents a labor-intensive chore for the technician. In particular, the process of analyzing SEM images and characterizing the resulting material still involves many time-consuming steps using various tools. At the same time, such characteristics as porosity, tortuosity, and diffusivity are very important factors for an expert in the process of making a decision on the applicability of the fabricated bioinorganic matrix in each specific case. Accordingly, the purpose of this research is to develop a set of algorithms for processing SEM-images. Also based on the set goal within the framework of the research we can distinguish a number of issues: development of algorithms for detection of objects in the image, development of a neural network model for refining the detection results, implementation of algorithms for calculating the characteristics of porous material, as well as design and execution of a number of verification tests to confirm the quality of the performed calculations. As a result of our research, we drew some conclusions. In particular, we found that an approach using synthetic data generation significantly speeds up and simplifies the learning process of neural networks, as well as improves the quality of output models. We also found that the algorithms we developed can fully automate the analysis of SEM images with porous structures, and their quality was confirmed through a number of verification tests. These algorithms can be applied to other similar problems related to image analysis and identification of features and characteristics.

SEM images; porosity; contour selection; segmentation; diffusivity; permeability; verification; materials; machine learning; morphology.

Введение. Бионеорганические матрицы являются важным объектом изучения в материаловедении, биологии и медицине. В тканевой инженерии клетки помещают на пористый трехмерный каркас, который обеспечивает поддержку и направляет клетки к росту новых тканеподобных структур [1, 2]. Матрицы могут обеспечить платформу для высвобождения факторов роста и доставки лекарств в контролируемых условиях [3]. Эффективная конструкция матриц имеет важное значение для остеоинтеграции. Современные методы изготовления матриц позволяют получать пористые трехмерные конструкции с порами различных форм и размеров [4]. Каркасные материалы обладают сложной структурой, включающей взаимосвязанные поры и каркасные элементы, которые определяют их механические, химические и функциональные свойства [5, 6]. После изготовления матрицы, в первую очередь, необходимо определить ее качество и применимость для конкретного случая, так как свойства ткани, для поддержки которой создавалась матрица, являются уникальными для каждого конкретного случая. Соответственно, после каждого эксперимента необходимо пройти процесс вычисления характеристик полученного каркаса.

В настоящее время этот процесс выполняется в полуавтоматическом режиме на основе экспертных знаний и аналитических выводов. Для детального анализа пор широко применяются изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (SEM). Этот метод позволяет исследовать микро- и наноструктуры с высокой точностью, обеспечивая визуализацию пористых структур и ключевых элементов матриц [7]. Для правильного анализа каркаса необходимо пройти через ряд процессов. Например, найти и зафиксировать поры на изображении, произвести расчет пористости, а также выходящие характеристики (извилистость, диффузность и т.п.). Однако сложная и неоднородная структура бионеорганических матриц существенно затрудняет процесс анализа, формируя дополнительные издержки в ходе исследования. Кроме этого, изучение каждой матрицы – это процесс достаточно рутинный для эксперта, поэтому нередки и ошибки вычислений.

С очередным этапом развития технологий искусственного интеллекта вопрос автоматизации и интеллектуализации процесса анализа бионеорганических матриц стал особенно актуальным. Современные алгоритмы машинного обучения предоставляют новые возможности для более точного анализа и характеристики таких структур [8, 9]. Мы также ранее поднимали тему достижений искусственного интеллекта в области тканевой инженерии в работе [10]. Наибольшая активность сейчас наблюдается в рамках процесса исследования SEM-изображений, так как он несет в себе большую рутинную трудоемкость и в первую очередь требует оптимизации. Однако, для достижения значительного прогресса в этой области необходимо решить ряд проблем результирующих изображений: шум, неоднородность освещения и сложные формы структур. Традиционные методы обработки включают фильтрацию шума, выравнивание контраста и пороговую сегментацию. Тем не менее, эти методы часто оказываются недостаточными для сложных и неоднородных структур бионеорганических матриц. Последние исследования в этой сфере показывают существенный прогресс в разрешении этих проблем.

Так, например, в исследовании [11] предложена вычислительная структура для точного обнаружения и анализа наночастиц на SEM-изображениях. Используя библиотеки Python, такие как OpenCV, SciPy и Scikit-Image, авторы применили комбинацию методов пороговой обработки, дилатации и эрозии для улучшения результатов обработки изображений. Этот подход продемонстрировал высокую точность в идентификации наночастиц, включая те, которые не были отмечены при ручной разметке. В работе [12] предложена новая ансамблевая модель глубокого обучения для точной классификации и обнаружения различных категорий дефектов на SEM-изображениях. Авторы обучили модели RetinaNet с различными архитектурами ResNet и VGGNet в качестве основы и сравнили их точность и производительность при обнаружении дефектов, таких как мостики, разрывы и обрушения линий. Предложенный ансамблевый метод продемонстрировал улучшение среднего показателя точности (mAP) для наиболее сложных классов дефектов. Также авторами в исследовании [13] предложен автоматизированный подход на основе глубокого обучения для эффективной локализации и классификации дефектов на SEM-изображениях. Они разработали архитектуру SEMI-CenterNet, обученную на SEM-изображениях дефектов полупроводниковых пластин, что позволило улучшить вычислительную эффективность по сравнению с предыдущими методами.

При этом все еще актуален вопрос полноценной автоматизации и актуализации непосредственно процесса анализа. Все текущие исследования в первую очередь развивают качество и точность отдельных его частей, таких как детекция пор, вычисление извилистости и так далее. Но использование этих решений все еще остается в рамках полуавтоматического процесса и требует полноценного экспертного вмешательства, соответственно не исключая рутины и снимая лишь часть нагрузки с исследователя.

Для решения задачи полноценной автоматизации мы предлагаем подход, основанный на использовании авторского алгоритмического комплекса. Мы разработали ряд алгоритмов и связали их в виде единого комплекса для работы с бионеорганическими матрицами. Этот метод позволяет полностью переложить рутинную нагрузку на автоматические вычисления, при этом сохранив экспертную ответственность за принятие решения для обеспечения максимального качества результата анализа конкретной матрицы.

Также мы разработали и применили ряд методов верификации для нашего программного комплекса и провели тестирование как каждого алгоритма, так и в целом всей системы, в результате которого сделали заключение о достаточном качестве всей системы для решения задач анализа бионеорганических матриц в автоматическом режиме.

1. Архитектура предложенного подхода. Разработанный комплекс можно разделить на 2 наиболее важных алгоритмических блока:

- 1) система детекции пор и преобразования данных SEM-изображения;
- 2) алгоритмическая модель для вычисления основных и дополнительных характеристик бионеорганических матриц.

Система детекции при этом является наиболее сложной и объемной задачей. Она должна решать основополагающую проблему анализа – качественную детекцию пор и извлечение первичных морфологических характеристик для дальнейшей передачи в математическую модель. При этом сама модель нейронной сети должна быть гибкой и легко масштабируемой.

Придерживаясь этой концепции, мы выполнили поиск набора данных, достаточного для обеспечения нужных нам технических характеристик системы. В частности, мы исследовали набор, представленный авторами в работе [14]. Однако, все обработанные нами данные не могли обеспечить достаточную точность модели. SEM-изображения, представленные в наборах, имели слишком мало отличий друг относительно друга, а следовательно, не могли полностью описать характеризующее признаковое пространство для качественной детекции.

Для решения задачи недостатка данных мы решили использовать метод, основанный на использовании синтетических данных для обучения модели. Этот подход был описан и апробирован нами в цикле статей [15–17]. Для создания результирующей обучающей выборки в рамках детекции по на SEM-изображениях было решено разработать генератор.

2. Генерация SEM-изображений. Разработка специального генератора позволит получить относительно бесконечное количество результирующих изображений, которые при этом будут достаточно отклонены друг от друга. При этом такой подход позволит обеспечить масштабируемость проекта, так как программные алгоритмы легко адаптируемы под задачу, в отличие от реальных данных.

Для достижения достаточного качества обучающего набора необходимо разработать модель данных, которая в достаточной степени охватит рассматриваемое множество признаков. Важнейшая часть подобной модели – формализация математических свойств генерируемых данных. В качестве свойств использовались специальные параметры, пригодные для применения в Евклидовом пространстве, которые могут принимать случайную величину (если быть точными – псевдослучайную). Комбинация таких параметров позволит изменять генерируемые данные, тем самым позволяя достигнуть достаточной ширины области данных. В результате была разработана аналитическая модель, состоящая из 7-ми основных величин.

Используя параметры для каждой генерируемой поры, стало возможным задавать фактор уникальности, который состоит из комбинации параметров и их величин. С помощью всего 7-ми допущенных характеристик появилась возможность оперирования

25-ю случайными параметрами в заданном диапазоне множества вещественных чисел. При этом их комбинации улучшают полноту данных, увеличивая число элементов множества допустимых значений, так как для каждой поры возможно задавать от 0 до 7 определенных модификаторов.

Прототип полученной аналитической модели реализован с помощью программной среды для создания компьютерной графики Blender с использованием пакета для написания программного кода Blender Python API.

Генерируемые поры без определенной четкой формы соответствуют реальным данным. Также, зачастую, во время генерации создаются случайные отклонения за пределами признакового пространства, то есть некоторые формы пор не могут встречаться в реальных экспериментах. В рамках обучающих данных модели – это хорошая практика, так как такие не соответствующие реальным сгенерированные виды пор симулируют частные случаи сложной идентификации, если пора, например, частично разрушена, или возможно перекрытие.

3. Обучение модели нейронной сети для детекции объектов. В рамках данного исследования не было необходимости в модели с измененной сложной архитектурой слоев, так как мы подготовили вспомогательный алгоритм сегментации контуров пор. Однако, крайне необходимо было реализовать качественную модель для разрешения ситуаций неочевидных детекций, которые пропускаются алгоритмом. Опираясь на наше прошлое исследование [18], было принято решение об обучении модели одноэтапного детектора YoloV7 на предобработанной выборке из синтетических данных. В ходе предварительной конфигурации параметров модели были выбраны оптимальные гиперпараметры, а также подтверждено точное количество данных для обучающей выборки – 4300 изображений. Набор такого объема оказался достаточным, так как в конце обучения функция точности выходила на стабильное плато, при этом ошибка сохраняла тренд стремления к 0. После выполнения итогового обучения модель показала достаточно высокие метрики и на тестовых примерах правильно детектировала необходимые поры.

4. Алгоритмическая модель вычисления характеристик пористых материалов. Вторым важным этапом в создании алгоритмического комплекса является разработка набора алгоритмов, которые позволят вычислять в автоматическом режиме морфологические характеристики бионеорганической матрицы. Именно по этим результатам эксперт сможет сделать заключение о применимости полученного каркаса в конкретном случае. Для вычисления всех характеристик были использованы данные от модели и вспомогательных алгоритмов, полученных на первом этапе работы всей системы. И первая основополагающая характеристика – пористость.

4.1. Пористость материала – это важная морфологическая характеристика, которая определяет долю объема или площади пор в общей структуре материала. Для её вычисления с использованием SEM-изображений мы использовали адаптированный алгоритм бинаризации. Так как в результате работы системы у нас есть данные по детектированным порам, мы можем сделать контрастными области внутри и за пределами пор, а далее уже вычислить количество белых пикселей, соответствующих пористой области, и общее количество пикселей изображения. Пористость на основе анализа изображений рассчитывается как отношение площади пор к общей площади. Этот подход позволяет точно оценить пористость двумерных изображений, что имеет важное значение для изучения структуры материала.

4.2. Анализ диффузности. Диффузность материала вычисляется с помощью анализа распределения интенсивности пикселей внутри пор на одном SEM-изображении. Для этого оценивалась однородность распределения интенсивности в пористой области: чем равномернее интенсивность, тем меньше препятствий для прохождения молекул или жидкостей через материал. Для каждой поры определяется среднее значение интенсивности, дисперсия и коэффициент вариации (CV), а также оценивается взаимосвязь полученных показателей с реальными транспортными свойствами. В качестве обобщенного выражения используются следующие соотношения:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_j; \quad CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_j - \mu)^2}}{\mu}; \quad D_{eff} = D_0 \frac{\varepsilon}{1 + kCV},$$

где I_j – интенсивность пикселя, μ – средняя интенсивность, N – число пикселей в поре, D_0 – базовый коэффициент диффузии для непористого материала, ε – пористость, k – эмпирический коэффициент, отражающий вклад неоднородности структуры в «трудно-проходимость» поровых каналов. Такая модель позволяет проводить количественный учёт влияния морфологических особенностей материала на его диффузные свойства, обеспечивая более объективную интерпретацию экспериментальных данных и обоснованные выводы о влиянии пористой структуры на эффективность транспортных процессов.

4.3. Расчет проницаемости на основе геометрических параметров пор. Проницаемость материала – это его способность пропускать жидкости или газы через поры. Она определяется геометрическими параметрами пористых структур, включая их размер, форму и связанность. Так как границы пор уже известны, то сначала рассчитываются размеры пор и их средние значения. Также анализируется степень связанности пор для оценки их способности к транспортировке жидкостей. На основе эмпирических формул, учитывающих пористость ε , средний размер пор d_p и связанность ζ вычисляется коэффициент проницаемости K . Чаще всего применяют обобщённую зависимость:

$$K = k_0 \frac{\varepsilon^3 d_p^2 \zeta}{\tau(1 - \varepsilon)^2},$$

где k_0 – эмпирическая константа, а τ – показатель извилистости пор. Этот показатель широко используется для оценки поведения материалов в условиях реального применения, таких как фильтрация или транспорт жидкостей.

5. Верификация методом сравнения масок сегментации. В ходе исследования мы получили набор алгоритмов, который позволяет вычислять основные характеристики пористости. Однако несмотря на то, что на аналитическом уровне алгоритмы показывают достаточно достоверные результаты, необходимо провести комплексную верификацию для подтверждения качества выходных данных. Это важно для обеспечения достаточного уровня достоверности результатов работы алгоритмов. Необходимо, чтобы на тестовых данных результаты комплекса соотносились с экспертным заключением. Успешное прохождение подобных тестов гарантирует качество системы в целом и достаточный уровень готовности для конечного пользователя.

Методы верификации позволяют количественно сопоставить результаты анализа с эталонными данными, выявить возможные ошибки и предложить пути для улучшения. Верификация направлена как на проверку точности сегментации, так и на оценку корректности расчёта морфологических и функциональных характеристик.

Одним из наиболее распространённых методов верификации, который мы использовали в своем исследовании, является сравнение масок сегментации, сгенерированных алгоритмом, с эталонными масками, разметка которых выполнена вручную. Для этого используются метрики, такие как коэффициент подобия Dice и IoU (Intersection over Union), которые дают количественную оценку точности совпадения сегментированных областей.

Коэффициент Dice рассчитывается по формуле:

$$D(A, B) = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|},$$

где A и B – рассматриваемые области на изображениях, $|A \cap B|$ – площадь пересечения, а $|A|$ и $|B|$ – площадь каждого множества в отдельности. Значение $D(A, B) \rightarrow 1$ при максимальном сходстве двух множеств, и равно 0 при полном отсутствии пересечений.

Метрика IoU используется для оценки точности сегментации, определяя степень перекрытия предсказанной и эталонной областей. Она вычисляется как отношение площади пересечения двух масок к площади их объединения. IoU широко применяется в компьютерном зрении, особенно в задачах семантической сегментации, поскольку позволяет количественно измерить точность модели независимо от масштаба изображений. В отличие от Dice, IoU более чувствителен к небольшим ошибкам на границах объектов, поскольку объединение учитывает как ложные срабатывания, так и пропущенные пиксели. Метрика IoU рассчитывается по следующей формуле:

$$IoU(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|},$$

где A – предсказанная маска, B – эталонная разметка, $A \cap B$ – количество пикселей в области пересечения, а $A \cup B$ – количество пикселей в объединённой области. Значение IoU принимает диапазон от 0 до 1. В задачах компьютерного зрения обычно пороговое значение IoU для корректного детектирования объектов устанавливается в диапазоне 0.5–0.75, в зависимости от требований к точности модели.

Демонстрация процесса валидации представлена на рис. 5, а-г, где (а) показаны исходные данные SEM-изображения, (б) синим цветом обозначена эталонная разметка, (в) красным выделены области, предсказанные алгоритмом, а (г) фиолетовые области отражают их совпадение. Такой подход позволяет наглядно оценить точность сегментации, выявить расхождения между эталоном и алгоритмом, а также количественно определить качество работы модели.

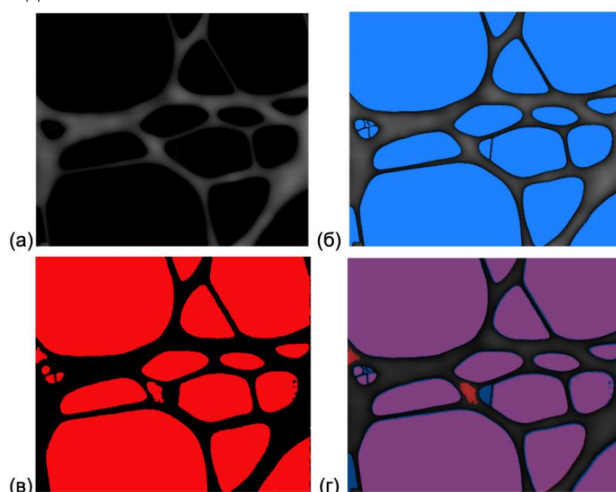


Рис. 1, а-г. Процесс валидации

В результате мы получили достаточно высокие показатели верификации по данным метрикам, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение масок сегментации метриками Dice и IoU

Тип масок	Dice, усредненный результат	IoU, усредненный результат
Синтетические данные	0.9403	0.9032
SEM-изображения с явно выраженной структурой пор	0.9114	0.8564
SEM-изображения со слабо выраженной структурой пор	0.8412	0.7621

6. Оценка точности расчета характеристик. После сегментации пористых структур выполняется расчёт их морфологических и функциональных характеристик, таких как пористость, проницаемость, извилистость и диффузность. Для оценки точности этих параметров результаты сравниваются с эталонными значениями, полученными из экспериментальных данных или ручного анализа.

Анализ ошибок включает детальное изучение причин расхождений между предсказанными и истинными значениями. Для нашего комплекса мы взяли несколько конкретных SEM-изображений. Далее мы произвели автоматический расчет характеристик, а затем на этом же примере провели аналитические расчеты с привлечением эксперта. Результаты по представленному изображению приведены в табл. 2.

Таблица 2

Рассчитанные характеристики материала в автоматическом и ручном режимах

Характеристика	Автоматически	Экспертным способом
Пористость, %	21.9	21.12
Извилистость	1,6	1,5
Проницаемость, м ² /с	$1,3 \times 10^{-14}$	$1,1 \times 10^{-14}$
Диффузность, м ² /с	$7,5 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$

Сравнив выходные данные, а также опираясь на исследования [19, 20], мы сделали вывод о высоком уровне сходства характеристик, вычисленных автоматически и ручным (экспертным) способом и, соответственно, об успешном прохождении проверки.

Заключение. Новизна проведенного исследования заключается в разработанном подходе, позволяющем автоматизировать и интеллектуализировать процесс анализа бионеорганических матриц. Для этого используется алгоритмический комплекс и вспомогательная модель компьютерного зрения.

В ходе работ был получен ряд результатов. Во-первых, был применен ранее представленный подход к обучению модели с помощью синтетических данных, и, соответственно, разработан генератор и сформирован обучающий набор данных. Далее качественно обучена модель компьютерного зрения на основе алгоритма одноэтапного детектора YOLOv7. Во-вторых, был разработан ряд алгоритмов для вычисления ключевых характеристик бионеорганической матрицы в автоматическом режиме по данным алгоритмов детекции.

Далее весь алгоритмический комплекс прошел ряд тестов на верификацию для подтверждения качества выходных данных и обеспечения достаточной точности вычислений. Верификация прошла успешно. Наконец, весь комплекс был поделен на 2 системных модуля:

1. Система детекции пор и преобразования данных SEM-изображения.
2. Алгоритмическая модель для вычисления основных и дополнительных характеристик бионеорганических матриц.

В данном исследовании есть ряд ограничений. Так, комплекс ограничен только данными SEM-изображений, некоторые характеристики сейчас не могут быть вычислены автоматически, и все еще должны рассчитываться вручную. Также пока нет алгоритмов проверки зависимостей. Все характеристики в какой-то степени зависимы друг от друга, и если эта зависимость явно нарушается, то необходимо проводить дополнительные изыскания на предмет поиска проблем. На текущий момент ответственность за подобные случаи лежит на эксперте, выполняющим анализ. Также отсутствуют алгоритмы верификации и проверки решения в реальном времени. Все значения характеристик вычисляются без опоры на некоторую базу эталонов или знаний. То есть система не может сказать, насколько вычисленные характеристики актуальны для текущего образа каркаса в конкретном случае.

Основное направление дальнейших исследований – это развитие данного комплекса алгоритмов в полноценную систему принятия решений по всему циклу экспериментов с бионеорганическими матрицами. На следующем этапе мы планируем внедрить комплекс проверки вычисленных характеристик, а затем систему предиктивных вычислений на основе нейро-нечеткой модели, чтобы можно было предсказать входные параметры для изготовления по требуемым выходным.

Работа поддержана Российским научным фондом в рамках гранта № 23-21-00331, <https://rscf.ru/project/23-21-00331/> (дата обращения 20.11.2024) и выполнена в Южном федеральном университете (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sultana N. Mechanical and biological properties of scaffold materials, *Functional 3D Tissue Engineering Scaffolds*, 2018, pp. 1-21.
2. Mosalaganti S., Kosinska A., Siggel M., Taniguchi R., Zimmerli C., Hagen W., Beck M. AI-based structure prediction empowers integrative structural analysis of human nuclear pores, *Science*, 2022, Vol. 376, No. 6598.
3. Laldinhari S., Akriti T., Jugal B., Punuri J.B. Various manufacturing methods and ideal properties of scaffolds for tissue engineering applications, *Smart Materials in Manufacturing*, 2023, Vol. 1, pp. 100011.
4. Chen M., Jiang R., Deng N., Zhao X., Li X. Natural polymer-based scaffolds for soft tissue repair, *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2022.
5. Nahannoghadam A., Asemani M., Goodarzi V., Barough S. In vivo investigation of PCL/PHBV/Hydroxyapatite Nanocomposite Scaffold in Regeneration of Critical-sized Bone Defects, *Fibers Polym.*, 2021, Vol. 22, No. 9, pp. 2507-2516.
6. Rezaee S., Shahrokhian S. Facile synthesis of petal-like NiCo/NiO-CoO/nanoporous carbon composite based on mixed-metallic MOFs and their application for electrocatalytic oxidation of methanol, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, Vol. 244, pp. 802-813.
7. Lanaro M., McLaughlin M., Simpson M., Buenzli P., Wong C., Allenby M., Woodruff M. A quantitative analysis of cell bridging kinetics on a scaffold using computer vision algorithms, *Acta Biomaterialia*, 2021, Vol. 136, pp. 429-440.
8. Wan H., Huang X., Junpeng W., Zhang Z. Importance of appropriate segmentation in pore structure analysis of coral reef limestone from CT images, *Marine Georesources & Geotechnology*, 2023, Vol. 42, No. 4, pp. 327-347.
9. Shi X., Misch D., Vranjes-Wessely S. A comprehensive assessment of image processing variability in pore structural investigations: Conventional thresholding vs. machine learning approaches, *Gas Science and Engineering*, 2023, Vol. 115, pp. 205022.
10. Kolomenskaya E., Butova V., Poltavskiy A., Soldatov A., Butakova M. Application of Artificial Intelligence at All Stages of Bone Tissue Engineering, *Biomedicines*, 2023, Vol. 12, No. 1, pp. 76.
11. Wright A. S., Youmans N. P., Araya E. F. V. Recursive Detection and Analysis of Nanoparticles in Scanning Electron Microscopy Images, 2023.
12. De Ridder V., Dey B., Dehaerne E., Halder S., Gendt S., Waeyenberge B. SEMI-CenterNet: A Machine Learning Facilitated Approach for Semiconductor Defect Inspection, 2023.
13. Kim Y.-H., Vijayavenkataraman S., Cidonio G. Biomaterials and scaffolds for tissue engineering and regenerative medicine, *BMC Methods*, 2024, Vol. 1, No. 1.
14. Aversa R., Modarres M., Cozzini S., Ciancio R., Chiusole A. The first annotated set of scanning electron microscopy images for nanoscience, *Sci Data*, 2018, Vol. 5, No. 1.
15. Polyanichenko D.S., Chernov A.V., Kartashov O.O., Alexandrov A.A., Butova V.V., Butakova M.A. Intelligent Detection of the Nanomaterials Spatial Structure with Synthetic Electron Microscopy Images, *2022 XXV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2022.
16. Kartashov O.O., Chapek S.V., Polyanichenko D.S., Belyavsky G.I., Alexandrov A.A., Butakova M.A., Soldatov A.V. Online Microfluidic Droplets Characterization Using Microscope Data Intelligent Analysis, *BDCC*, 2023, Vol. 7, No. 1, pp. 7.
17. Alexandrov A.A., Kartashov O.O., Polyanichenko S.S., Nebaba A.N., Polyanichenko D.S., Butakova M.A. Intelligent Analysis of Optical Microscopy Images for Microfluidic Synthesis Results, *2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2023, pp. 297-300.
18. Poltavskiy A., Kolomenskaya E., Belyavsky G., Butova V., Butakova M. Synthesis and Analysis of Porous Frame Structures Images Using Machine Learning Methods, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2024, pp. 389-401.
19. Yuan L., Liu Z., Tian C., Yan Z., Yu J., Hou X., Zhu Q. Structure and properties of Al₂O₃-bonded porous fibrous YSZ ceramics fabricated by aqueous gel-casting, *Ceramics International*, 2021, Vol. 47, No. 18, pp. 250-265.
20. Rosentreter H., Walther M., Lerch A. Partial Desalination of Saline Groundwater: Comparison of Nanofiltration, Reverse Osmosis and Membrane Capacitive Deionisation, *Membranes*, 2021, Vol. 11, No. 2, pp. 126.

Полтавский Артем Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: poltavsky@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; Международный исследовательский институт интеллектуальных материалов ЮФУ; аспирант.

Поляниченко Дмитрий Сергеевич – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте АО «НИИАС», Ростовский филиал; e-mail: d.polyanichenko@vniias.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; главный специалист.

Коломенская Екатерина Романовна – Южный федеральный университет; e-mail: kolomenskaya@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; Международный исследовательский институт интеллектуальных материалов ЮФУ; инженер.

Бутакова Мария Александровна – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте АО «НИИАС», Ростовский филиал; e-mail: m.butakova@vniias.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; д.т.н.; профессор; г.н.с.

Poltavskiy Artem Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: poltavsky@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the International Research Institute of Intelligent Materials of the Southern Federal University; post-graduate student.

Kolomenskaya Ekaterina Romanovna – Southern Federal University; e-mail: kolomenskaya@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; The International Research Institute of Intelligent Materials of the Southern Federal University; engineer.

Polyanichenko Dmitry Sergeevich – JSC NIIAS; e-mail: d.polyanichenko @vniias.ru; Rostov-on-Don, Russia; team lead.

Butakova Maria Aleksandrovna – JSC NIIAS; e-mail: m.butakova@vniias.ru; Rostov-on-Don, Russia; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

УДК 004.942, 654.924.56

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-65-81

С. Сингх, А.В. Прибыльский, Е.Ю. Косенко

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ

Раннее обнаружение пожароопасных ситуаций является критически важным аспектом обеспечения безопасности, так как позволяет минимизировать риск материальных и человеческих потерь. Заблаговременное выявление угроз способствует сохранению материальных ценностей, уменьшению времени на их восстановление и, что важнее, спасению человеческих жизней. В связи с этим, предлагается новый подход к прогнозированию пожароопасных ситуаций: алгоритм обучения модели прогнозирования пожароопасных ситуаций, а также алгоритм прогнозирования пожароопасных ситуаций, которые разрабатываются на моделях машинного обучения таких как рекуррентные нейронные сети, случайный лес, оптимизационные деревья, авторегрессионные нейронные сети и т.д. В исследовании предлагается рассмотреть алгоритмы прогнозирования пожароопасных ситуаций, разработанных на основе анализа существующих алгоритмов прогнозирования, включая методы на основе машинного обучения, статистические модели и симуляционные подходы, учитывая их преимущества и недостатки, показатели точности. Результаты исследования разработанных алгоритмов показывают, что они способны с точностью 93.33% предсказывать значение температуры снаружи датчика на основе тестовых данных с комплекса взаимосвязанных пожарных датчиков, с ошибками MAE = 1.72, MSE = 2.95 в нештатном режиме на тестовых данных, и с точностью 92.85% температура внутри датчика, ошибки MAE = 1.66, MSE = 2.75. Точность на тестовых данных в штатном режиме для температуры снаружи составили 96.27%, ошибки MAE = 1.22, MSE = 1.48, а точность прогнозирования температуры внутри составила 96.16%, ошибки MAE = 1.24, MSE = 1.53. Для тестовой выборки в 500 000 отсчетов, ошибки спрогнозированной температуры снаружи составили: MAE = 1.82, а MSE = 3.31, а точность составили 91.78%. Ошибки спрогнозированной температуры внутри (temp2_inside) составили: MAE = 1.89, а MSE = 3.57, а точность составили 91.35%.

Пожарный датчик; Python; алгоритм прогнозирования; алгоритм обучения; прогнозирования; анализ алгоритмов прогнозирования.

S. Singh, A.V. Pribylskiy, E.Y. Kosenko

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ALGORITHMS FOR FORECASTING FIRE HAZARDOUS SITUATIONS

Early detection of fire hazard situations is a critical aspect of ensuring safety, as it helps to minimize the risk of material and human losses. Early detection of threats helps to preserve material assets, reduce the time for their restoration and, more importantly, save human lives. In this regard, a new approach to predicting fire hazard situations is proposed: an algorithm for training a model for predicting fire hazard situations, as well as an algorithm for predicting fire hazard situations, which are developed on machine learning models such as recurrent neural networks, random forest, optimization trees, autoregressive neural networks, etc. The study proposes to consider algorithms for predicting fire hazard situations developed on the basis of an analysis of existing forecasting algorithms, including methods based on machine learning, statistical models and simulation approaches, taking into account their advantages and disadvantages, accuracy indicators. The results of the study of the developed algorithms show that they are capable of predicting the outside temperature value of the sensor with an accuracy of 93.33% based on the test data from a complex of interconnected fire sensors, with errors of $MAE = 1.72$, $MSE = 2.95$ in the abnormal mode on the test data, and with an accuracy of 92.85% for the temperature inside the sensor, errors $MAE = 1.66$, $MSE = 2.75$. The accuracy on the test data in the normal mode for the outside temperature was 96.27%, errors $MAE = 1.22$, $MSE = 1.48$, and the accuracy of predicting the inside temperature was 96.16%, errors $MAE = 1.24$, $MSE = 1.53$. For the test sample of 500,000 readings, the errors of the predicted outside temperature were: $MAE = 1.82$, and $MSE = 3.31$, and the accuracy was 91.78%. The errors of the predicted temperature inside (temp2_inside) were: $MAE = 1.89$, and $MSE = 3.57$, and the accuracy was 91.35%.

Fire detector; Python; forecasting algorithm; learning algorithm; forecasting; forecasting algorithm analysis.

Введение. Прогнозирование пожароопасных ситуаций является одной из актуальных задач в области пожарной безопасности не имеющих единого и точного решения. Своевременное обнаружение и предупреждение пожаров позволяет значительно снизить риск человеческих жертв и материальных потерь. Традиционные системы мониторинга, основанные на пороговых значениях датчиков дыма и температуры, способны реагировать только на уже возникшие угрозы, кроме того быстродействие этих систем также зависит от целого ряда факторов: количество датчиков, расположения датчиков, чувствительность датчиков, алгоритма порогового обнаружения и т.д.. При этом даже системы с высокой чувствительностью и скоростью обнаружения не способны прогнозировать будущие угрозы, информировать и выполнять действия по предотвращению возникновения пожароопасной ситуации. В связи с этим, становятся актуальными разработка и исследование новых подходов к прогнозированию пожароопасных ситуаций как на основе классических статистических методов, так и набирающих популярность моделях машинного обучения, например использование рекуррентных нейронных сетей (RNN) или моделей на основе деревьев решений.

Рекуррентные нейронные сети обладают способностью моделировать временные зависимости и учитывать динамические изменения параметров, что делает их подходящими для анализа данных с пожарных датчиков. Деревья решений, в свою очередь, предоставляют интерпретируемую модель, которая может быть адаптирована и настроена для конкретных условий, что может быть полезно при эксплуатации датчиков в определенной области с изменяющимися параметрами, значение, которых можно приближенно рассчитать по составленной древовидной логической сети.

Однако прежде, чем приступать к выбору архитектуры, параметров, топологии модели машинного обучения, следует выбрать и разработать алгоритм обучения модели прогнозирования, таким образом, чтобы он подходил для большинства моделей машинного обучения применяемых для решения задачи прогнозирования с минимальными изменениями в структуре алгоритма. Следующим, но не менее важным этапом, является выбор самого алгоритма прогнозирования, потому как даже обладая точной и быстрой обученной моделью, при непроработанном алгоритме прогнозирования, можно по итогу

получить спрогнозированные данные с неудовлетворительной точностью. Алгоритм прогнозирования позволяет учитывать, параметры, факторы, которые сложно или невозможно учесть при обучении модели прогнозирования, например фильтрация выходных данных, сложная задача машинного обучения, в некоторых ситуациях – нерешаемая.

В данной статье рассматриваются исследования касающиеся разработки алгоритма прогнозирования и алгоритма обучения модели прогнозирования на основе рекуррентных нейронных сетей и деревьев решений, способных своевременно и с определенной точностью предсказывать пожароопасные ситуации на основе данных с комплекса взаимосвязанных пожарных датчиков.

Анализ аналогов. На сегодняшний день алгоритмы прогнозирования пожароопасных ситуаций преимущественно применяются для прогнозирования пожаров в лесах, а также для прогнозирования площади будущего расширения зоны пожара. Тем не менее, существующие решение в своей основе используют разные подходы к прогнозированию пожаров. В рамках текущего анализа условно можно выделить следующие подходы к построению алгоритмов прогнозирования:

- 1) на основе машинного обучения [1];
- 2) статистические модели [2];
- 3) на основе симуляции [3].

В работе [1] проведено исследование прогнозирования риска лесных пожаров в районе Хэйхэ (провинция Хэйлунцзян, Китай) с использованием алгоритмов машинного обучения Random Forest (RF) и Backpropagation Neural Network (BPNN). Анализируются ключевые факторы, влияющие на возникновение пожаров, такие как метеорологические данные, топография и человеческая активность. Модели оцениваются с помощью ROC-кривой.

Алгоритм на основе RF работает следующим образом: пусть обучающий набор данных $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$. Финальное классификационное решение $H(x)$ принимается как:

$$H(x) = \arg \max_{y \in Y} \sum_{i=1}^{n_{tree}} I(h_i(x) = y), \quad (1)$$

где $h_i(x)$ – слабый классификатор, а $I(h_i(x) = y)$ – индикаторная функция, x_i, y_i – входные и выходные данные соответственно. Для заданных классификационных моделей $m_1(x), m_2(x), \dots, m_k(x)$ маргинальная функция вычисляется как:

$$mg(x, y) = a\vartheta_k I(m_k(x) = y) - \max_{j \neq k} a\vartheta_k I(m_k(x) = j), \quad (2)$$

где $a\vartheta_k$ – среднее значение индикаторной функции для k -го классификатора, j – альтернативный класс, отличный от k .

Ошибки определяются как:

$$PE = P_{x,y}(mg(x, y) < 0), \quad (3)$$

где $P_{x,y}$ – вероятность того, что маргинальная функция $mg(x, y)$ отрицательна, что указывает на ошибку классификации.

BPNN работает следующим образом: входные обучающие образцы проходят через сеть слой за слоем, на выходном слое сравнивается ошибка между фактическим и ожидаемым выходным значением, ошибка обратно распространяется, и веса и пороги корректируются слой за слоем, пока ошибка не уменьшится до заданного уровня точности. BPNN можно оптимизировать, изменяя топологию сети, скорость обучения, начальные веса и пороги.

К преимуществам метода можно отнести:

- ♦ высокая точность прогнозирования (оба метода показали area under the curve (AUC) > 0,93);
- ♦ способность работать с большими и сложными данными;
- ♦ устойчивость к шуму и выбросам;

К недостаткам метода можно отнести:

- ◆ необходимость большого объема данных для обучения;
- ◆ сложность интерпретации результатов (особенно для RF);
- ◆ риск переобучения при неправильной настройке (особенно для BPNN).

Исследование [2] посвящено оценке двух подходов к прогнозированию экстремальной опасности пожаров в Австралии: динамической модели климатической симуляции Australian Community Climate and Earth-System Simulator (ACCESS-S2) и статистической модели, основанной на климатических драйверах (фактор климата). Анализируются три значимых случая экстремальных пожаров: Canberra (2003), Black Saturday (2009) и Pinery (2015). Статистическая модель, построенная с использованием линейной логистической регрессии, показала более высокую вероятность обнаружения (POD) по сравнению с динамической моделью, но также имела более высокий уровень ложных срабатываний (FAR).

Статистическая модель основана на линейной логистической регрессии, которая использует климатические индексы для прогнозирования вероятности экстремальных значений индекса поведения огня (FBI). Модель строится на основе данных о климатических драйверах, таких как MJO, ENSO, IOD, SAM, блокирование потока и субтропический хребет. Вероятность экстремальных пожаров определяется как бинарная переменная (да/нет) на основе порога 0,1.

К преимуществам метода можно отнести:

- ◆ простота реализации модели, а так интерпретируемость;
- ◆ статистическая модель показала вероятность обнаружения (POD) в диапазоне 0,57–0,87, что значительно выше, чем у динамической модели (0,03–0,57);
- ◆ возможность использования для долгосрочных прогнозов (до нескольких месяцев).

К недостаткам метода можно отнести:

- ◆ высокий уровень ложных срабатываний (FAR), в диапазоне 0,44–0,66;
- ◆ ограниченная способность учитывать нелинейные зависимости между климатическими драйверами и пожарами;
- ◆ зависимость от точности данных о климатических драйверах.

Проанализируем статью [3]. Алгоритм прогнозирования распространения лесных пожаров, использованный в исследовании, основан на модели WRF-SFIRE. Эта модель объединяет метеорологическое моделирование с моделированием распространения пожаров, что позволяет учитывать взаимодействие между атмосферными условиями и динамикой пожара. Основные этапы алгоритма:

1) Сбор данных:

- ◆ метеорологические данные: используются прогнозируемые данные от Global Forecast System (GFS) с разрешением 0.25 градуса. Эти данные включают температуру, скорость и направление ветра, относительную влажность и другие метеорологические параметры;
- ◆ топливные параметры: собираются данные о глубине топлива, нагрузке топлива и содержании влаги на основе полевых образцов, взятых из 23 участков. Топливо классифицируется по размерам (1h, 10h, 100h, 1000h) и анализируется для определения его свойств, таких как содержание влаги и соотношение поверхности к объему (SAVR);
- ◆ данные о рельефе: используется цифровая модель рельефа (DEM) с разрешением 12.5 м, полученная от спутниковых данных ALOS PALSAR;
- ◆ карта землепользования и растительности (LULC): используется карта в масштабе 1:10,000, предоставленная Департаментом науки и технологий Сиккима, Индия.

2) Подготовка данных:

- ◆ метеорологические данные динамически уточняются с помощью вложенных доменов в модели WRF, что позволяет достичь высокого разрешения (до 40 м) для моделирования распространения пожара;
- ◆ топливные параметры связываются с классами растительности на карте LULC, что позволяет создать карту топлива с разрешением 40 м.

3) Моделирование распространения пожара:

- ◆ модель Ротермеля: используется для оценки скорости распространения пожара. Эта модель основана на балансе тепла и учитывает параметры топлива (глубина, нагрузка, содержание влаги) и метеорологические условия (скорость ветра, уклон местности);
- ◆ метод уровней множеств: применяется для моделирования распространения пожара в сетке с высоким разрешением. Этот метод позволяет отслеживать эволюцию пожара во времени и пространстве с использованием уравнений в частных производных.

4) Инициация пожара – в качестве точки инициации пожара используются данные о текущих пожарах, полученные от спутниковых сенсоров VIIRS. Эти данные синхронизируются с прогнозируемыми метеорологическими данными для динамического моделирования распространения пожара.

5) Прогнозирование – модель выполняет 24-часовой прогноз распространения пожара, учитывая взаимодействие между атмосферными условиями и пожаром. Результаты прогноза включают карты выгоревшей территории с разрешением 40 м.

6) Валидация – прогнозируемая выгоревшая территория сравнивается с фактической выгоревшей территорией, определенной на основе спутниковых данных Sentinel 2. Это позволяет оценить точность модели.

К преимуществам метода можно отнести:

- ◆ модель учитывает динамическое взаимодействие между атмосферными условиями и поведением пожара, что позволяет более точно прогнозировать изменения в направлении и скорости распространения огня;
- ◆ точность совпадения прогнозируемой и фактической выгоревшей территории составили 0.85–0.9, за исключением небольших расхождений в юго-западном направлении.

К недостаткам метода можно отнести:

- ◆ для выполнения 24-часового прогноза потребовалось 2 часа 11 минут на суперкомпьютере PARAM SEVA с использованием 240 ядер, что указывает на значительные вычислительные ресурсы;
- ◆ в некоторых регионах может отсутствовать достаточное количество данных о топливе, что снижает точность прогноза. Например, в исследовании использовалась модифицированная модель Андерсона из-за недостатка локальных данных;
- ◆ в горных районах оползни могут изменять ландшафт и действовать как барьеры для пожаров, но они не всегда учитываются в картах растительности, что снижает точность прогноза.

Приведем результаты анализа в виде табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная анализ алгоритмов прогнозирования

Алгоритм	Точность	Работа в режиме реального времени	Устойчивость к шумам и выбросам	Нахождение сложных нелинейных зависимостей
На основе машинного обучения	Высокая 0.93 и выше	да	да	да
Статистические модели	Средняя (0.57-0.87)	да	нет	нет
На основе симуляции	Высокая 0.85-0.9	Да (но, самая высокая ресурсозатратность)	да	да

Анализ исследований [1–3] показывает, что машинное обучение может обеспечивать высокую точность прогнозирования, но чем, сложнее объект прогнозирования и задачи прогнозирования, тем более мощные вычислительные ресурсы могут потребоваться для обуче-

ния, совместно с большими объема обучающих и тестирующих данных. Статистические модели, как правило используются для анализа и предсказания будущих пожаров с большой длиной предсказаний, при этом они не применимы для работы в режиме реального времени, в виду своей низкой точностью и невозможностью к адаптации к изменяющимся данным. Симуляционные модели позволяют с помощью симуляции прогнозировать развитие площади пожаров, визуализируя его на понятном даже обычному пользователю изображении, однако такие системы требуют построения детальной и адекватной математической модели объекта управления, что в некоторых ситуациях является невозможным, кроме того для моделирования пожара требуется гораздо больше вычислительных ресурсов, чем для прогнозирования пожаров с помощью машинного обучения или статистическим методом. Для универсального пожарного датчика [4–6] требуется подход, позволяющий прогнозировать пожароопасные ситуации в режиме реального времени с минимальным количеством запросов на настройку параметров алгоритмов, среди рассмотренных алгоритмов этим требованиям соответствуют алгоритмы прогнозирования на основе машинного обучения, которая позволяет находить скрытые функциональные зависимости в данных, тем самым прогнозирование данных основывается не только на имеющихся статистических данных, но и с учетом найденных скрытых зависимостей, которые интерпретируются алгоритмами машинного обучения, как функционально-весовыми (взвешенные зависимости), логически-весовыми (взвешенные логические условия) связями между параметрами.

Описание универсального датчика в виде модели вход-выход. Универсальный пожарный датчик представляет из себя комплекс взаимосвязанных датчиков [7, 8], с настраиваемыми параметрами, который в зависимости от настроек, входных потоков, возмущающих воздействий генерирует комплексный выходной сигнал. Параметрическая модель универсального датчика представлена на рис. 1.



Рис. 1. Параметрическая модель универсального пожарного датчика

Входящие преобразуемые информационные потоки:

- ♦ температура – измеряется из окружающей среды в месте установки, для этой цели используются 8 датчиков температуры разной инерционности, из которых 1 с самой низкой инерционностью и 1 с самой высокой инерционностью (0–80 градусов).
- ♦ задымленность по ультрафиолетовому спектру – обнаруживается и измеряется с помощью трех датчиков задымленности ультрафиолетового спектра (0–65 556 аналоговых отсчетов);
- ♦ задымленность по инфракрасному спектру – обнаруживается и измеряется с помощью трех датчиков задымленности инфракрасного спектра (0–65 556 аналоговых отсчетов).

Возмущающие воздействия:

- ♦ электромагнитные помехи – внешние помехи, которые могут приводить к искажению [9] показанию датчика, интенсивность помех: 0–100 мВ (милливольт) для слабых помех, 100–1000 мВ для умеренных помех, >1 В (вольт) для сильных помех, частота помех: 50–60 Гц (частота сетевого напряжения), 100–500 МГц и выше (радиочастоты), 2.4–5 ГГц (Wi-Fi, Bluetooth);

- ♦ вибрации – возникают при размещении в агрессивных средах, например в вагоне метрополитена постоянно на датчик воздействует вибрация [10], амплитуда вибраций: 0–5 м/с² (миллиметры на секунду в квадрате) для слабых вибраций, 5–20 м/с² для умеренных вибраций, >20 м/с² для сильных вибраций, частота вибраций: 1–10 Гц (низкочастотные вибрации), 10–100 Гц (среднечастотные вибрации), >100 Гц (высокочастотные вибрации);

- ♦ влажность – искажают показания датчиков задымленности, в метрополитенах, например, это может быть туман, относительная влажность: 0–30% для сухого воздуха, 30–70% для нормальных условий, 70–100% для высокой влажности, абсолютная влажность: 0–10 г/м³ (граммов воды на кубический метр) для сухого воздуха, 10–20 г/м³ для нормальных условий, >20 г/м³ для высокой влажности.

Управляющие входы, параметры датчиков такие как: чувствительность (настраиваемый параметр для датчиков, 0-2 градуса для температурных датчиков, 0.1 -1% отсчетов для датчиков задымленности) [11, 12], пороги срабатывания (настраивается программно в пределах диапазона измерений), частота опроса датчика (настраивается, по умолчанию 5 раз в секунду), частота считывания информации датчиков (настраивается, по умолчанию 5 раз в секунду).

Выходы:

- ♦ преобразованная информация – обработанные данные с датчиком, передающиеся на центр обработки информации (контроллер, компьютер, диспетчерская и т.д.), в котором в зависимости от предусмотренных алгоритмов выполняются определенные предписания (Спрогнозированные значения, температур, задымленности, а также в некоторых случаях статистические параметры: дисперсия, производная определенного параметра, математическое ожидание и т.д.)

- ♦ средство пожаротушения – сигналы для активации средств пожаротушения, таких как спринклерные системы, огнетушители и т.д. (сигнал активации 0 или 1);

- ♦ индикаторы состояния – визуальные и звуковые сигналы, информирующие о текущем состоянии датчика (сигнал активации 0 или 1).

Алгоритм обучение и тестирования моделей прогнозирования пожароопасных ситуаций. Одним из основных и важных составляющих решения задачи прогнозирования данных, является выбор и описание алгоритма прогнозирования, которые определяют набор инструкций, которые необходимы для достижения поставленной цели, при этом алгоритм должен предусматривать возможность использования различных моделей совместно с представленным набором действий. В рамках статьи ниже предложен алгоритм прогнозирования и алгоритм обучения моделей прогнозирования, которые в качестве моделей использует RNN (recurrent neural network) и их модификации, а также модели на основе деревьев решений. Алгоритм обучения модели прогнозирования представлен на рис. 2,а.

На рис. 2,а используются 4 функции «Стандартизация формата времени», «Добавление новых параметров», «Разделение данных на тестовые и обучающие», «Выбор признаков для обучения», алгоритм, которых представлен ниже.

Задача алгоритма «Стандартизация формата времени» (рис. 2,б) заключается в стандартизации формата времени [13, 14] считанных данных, т.е. приведение к общему формату. Целевой формат имеет вид (4):

$$data_{time} = DD.MM.YYYY HH:MM:SS, \quad (4)$$

где DD – день месяца (01-31), MM – месяц (01-12), YYYY – год (четырёхзначное число), HH – часы в 24-часовом формате (00-23), MM – минуты (00-59), SS – секунды (00-59).

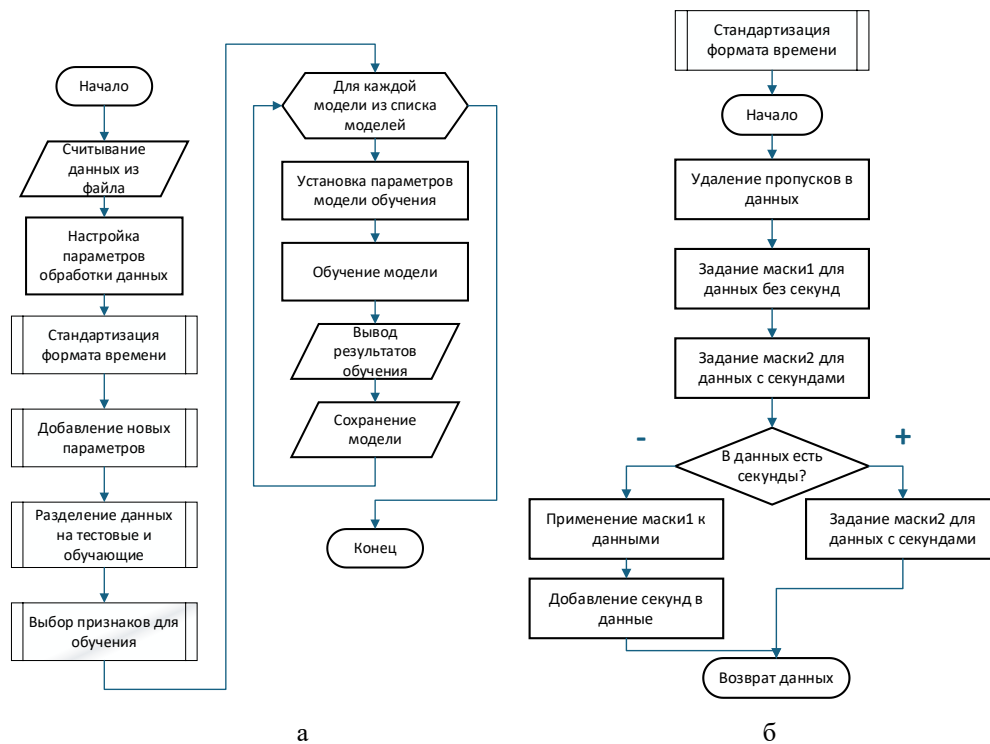


Рис. 2. а – алгоритм обучения модели прогнозирования, б – алгоритм функции «Стандартизация формата времени»

Алгоритм добавление новых параметров представлен на рис. 3.

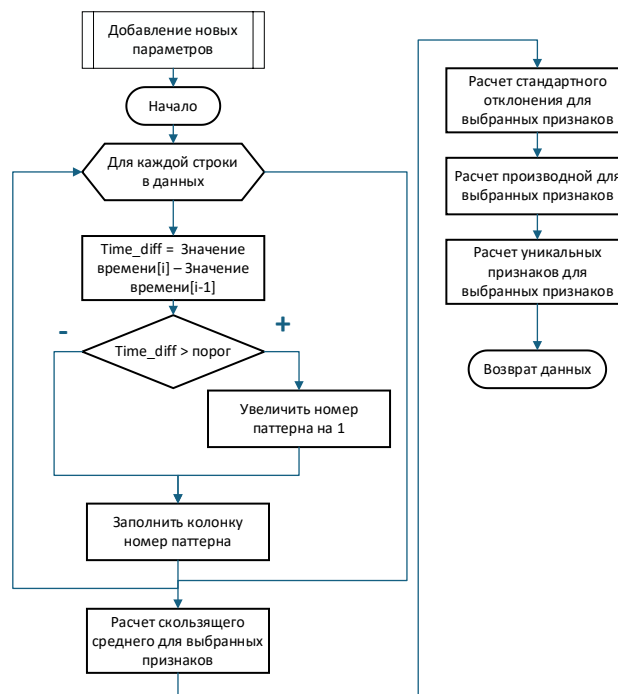


Рис. 3. Алгоритм функции «Добавление новых параметров»

Функция «Добавление новых параметров» добавляет признаки в данные, которые необходимы для обучения модели прогнозирования конкретного параметра, при этом, добавление дополнительных признаков может повысить точность модели.

Задача функции «Преобразование в формат для обучения» (рис. 4) заключается в преобразовании данных в «supervised data», которая будет хранить в себе историю о прошлых показаниях для каждой строки, тем самым добавляя «память о прошлом» в базу данных.

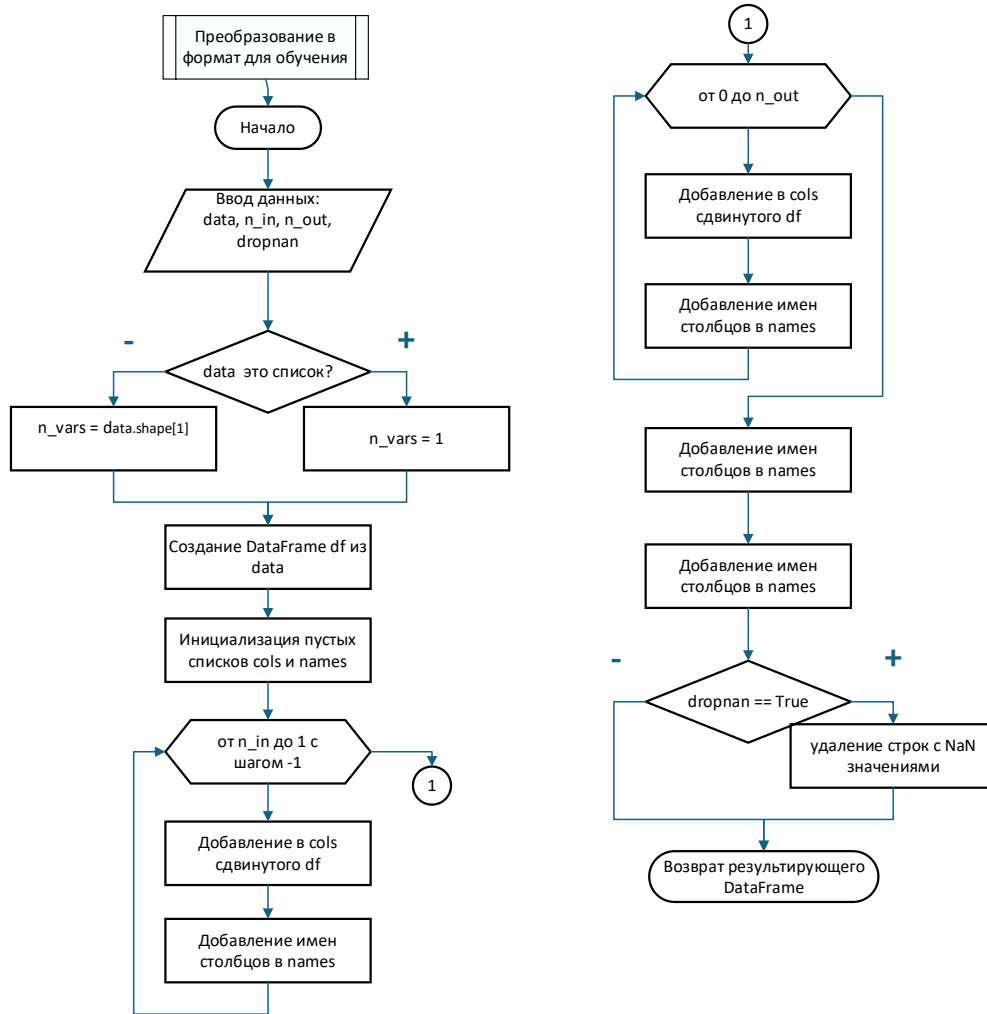


Рис. 4. Алгоритм функции «Преобразование в формат для обучения»

Следующим этапом обучения модели прогнозирования, является применением обученной модели на тестовых данных. Перед этим необходимо вызвать функцию разделения данных (рис. 5,а), функцию выбора признаков обучения (рис. 5,б). Алгоритм прогнозирования представлен на рис. 5,в.

Функция «Разделение данных на тестовые и обучающие», разделяет данные на тренировочные – используемые для обучения модели и тестовые – используемые для проверки работоспособности модели.

Функция «Выбор признаков для обучения» преобразовывает данные Test и Train, оставляя в ней только признаки необходимые для обучения модели.

Раскроем подробнее алгоритм функций «Прогнозировать будущие значения» (рис. 6).

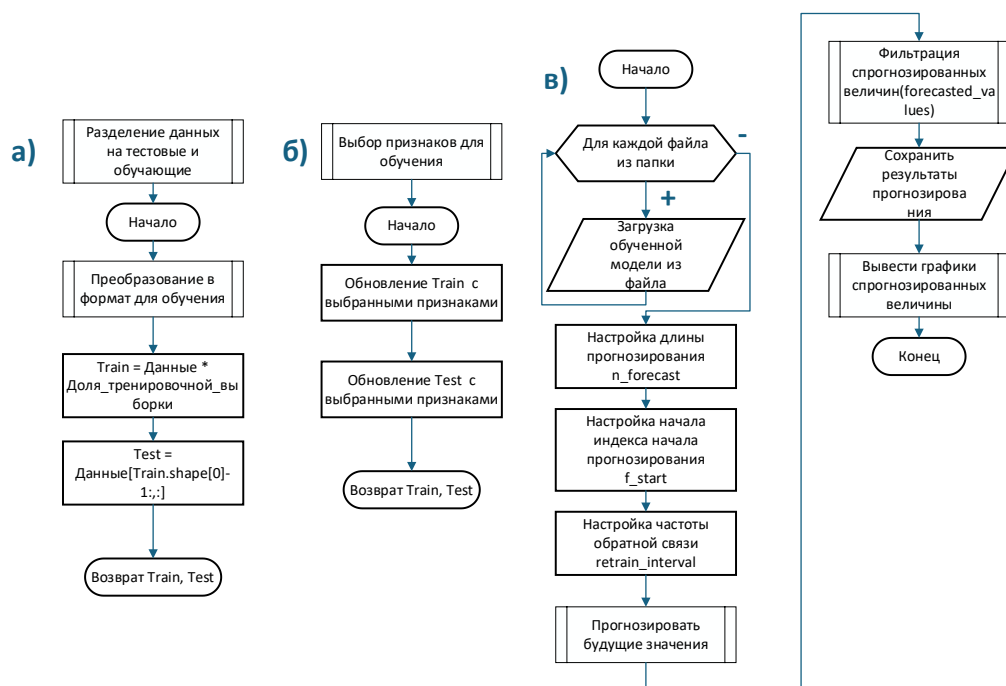


Рис. 5. Алгоритм функций: а – функция разделения данных, б – функция выбора признака для обучения, в – алгоритм прогнозирования

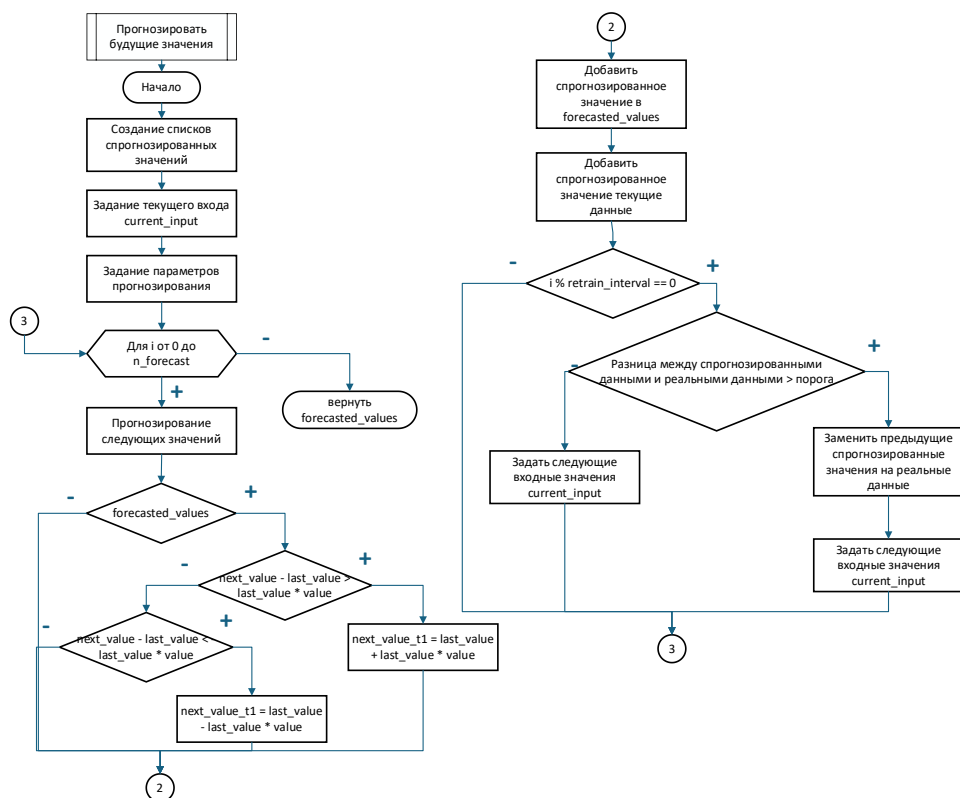


Рис. 6. Алгоритм функции «Прогнозировать будущие значения»

На рис. 6 представлена часть алгоритма функции «Прогнозировать будущие значения», в ней описана инициализация переменных, задание входных значений, а также приведено условие коррекции спрогнозированных значений.

После блока ссылка (под №2) следующая идущая часть алгоритма выполняет задачу обратной связи спрогнозированных данных с реальными данным, а именно корректирует прошлые спрогнозированные значения заменяя их на реальные данные, если разница между ними превышает определенное значение.

Раскроем алгоритм функции «Фильтрация спрогнозированных величин» (рис. 7)

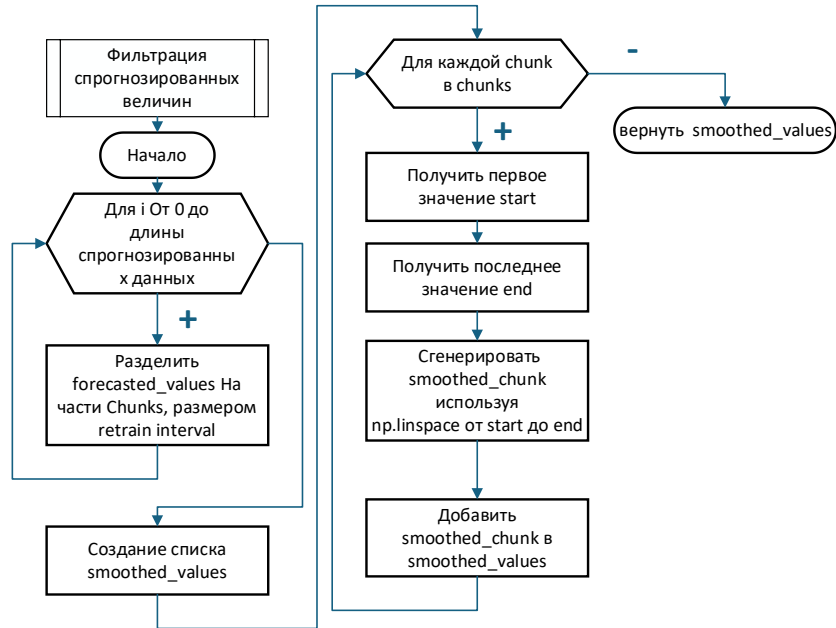


Рис. 7. Алгоритм функции «Фильтрация спрогнозированных величин»

Задача функции «Фильтрация спрогнозированных величин» (рис. 7) заключается в сглаживании спрогнозированных значений для упрощения дальнейшего анализа и обработки данных, например для классификации данных, с целью выявления пожароопасных ситуаций.

Подготовка данных. В качестве данных для обучения и тестирования алгоритма прогнозирования, используются реальные данные выгруженный из базы данных метрополитенов, в которых установлены универсальные пожарные датчики. Перед использование этих данных в представленном алгоритме необходимо выполнить парсинг данных для того, чтобы его можно было использовать в моделях прогнозирования. После парсинга данные имеют вид, представленный на рис. 8.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	date_time	temp1_outside	temp2_inside	Smoke_red_1	Smoke_red_2	Smoke_red_3	Smoke_blue_1	Smoke_blue_2	Smoke_blue_3
2	29.01.2021 0:00:00	16.61	16	60121	60124	60118	60117	60121	60120
3	29.01.2021 0:00:05	16.7	15.97	60120	60121	60120	60117	60122	60119
4	29.01.2021 0:00:10	16.66	15.98	60120	60119	60123	60117	60117	60120
5	29.01.2021 0:00:15	16.63	15.96	60119	60123	60122	60119	60117	60117
6	29.01.2021 0:00:20	16.6	15.98	60122	60123	60120	60119	60120	60118
7	29.01.2021 0:00:25	16.56	15.96	60122	60119	60118	60117	60124	60122
8	29.01.2021 0:00:30	16.57	16	60121	60122	60124	60124	60117	60122
9	29.01.2021 0:00:35	16.56	15.99	60121	60119	60124	60118	60123	60122
10	29.01.2021 0:00:40	16.58	15.96	60120	60120	60122	60121	60119	60124
11	29.01.2021 0:00:45	16.55	15.98	60119	60124	60122	60119	60119	60121
12	29.01.2021 0:00:50	16.56	15.98	60121	60121	60120	60119	60124	60119
13	29.01.2021 0:00:55	16.52	15.98	60124	60121	60121	60118	60118	60120
14	29.01.2021 0:01:00	16.51	15.98	60119	60119	60123	60123	60117	60121

Рис. 8. Пример обработанных данных выгруженных из базы данных метрополитена

В зависимости от используемой модели данных могут вводиться новые параметры, полученные как путем математических вычислений с текущими данными (среднее значение, дисперсия, производная и т.д.), так и параметры на основе экспертных знаний или результатов модели прогнозирования (история показаний, паттерн данных и т.д.).

Тестирование алгоритмов. Тестирование представленных алгоритмов осуществляется с применением модели прогнозирования на основе дерева решения Random Forest (Случайные лес) [15–18], в качестве прогнозируемых параметров выбраны temp1_outside и temp2_inside, обучающая выборка составила 1 200 000 отсчетов В результате обучение получены модели, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Результат обучение моделей

Название модели	Объем занимаемой памяти	Параметр	Диапазоны значений
model_rf_temp1.pkl	404 МБ	Температура снаружи датчика	0 – 80 °С
model_rf_temp2.pkl	411 МБ	Температура внутри датчика	0 – 80 °С
model_rf_blue1.pkl	69 МБ	Задымленность по ультрафиолетовому каналу	0 – 65 556
model_rf_red.pkl	71 МБ	Задымленность по инфракрасному каналу	0 – 65 556

Применим полученные нормализованные данные в ранее представленных алгоритмах прогнозирования (рис. 5–7).

В качестве метрики оценки точности прогнозирования будет использоваться средняя абсолютная ошибка и среднеквадратичная ошибка [19, 20].

Формула средней абсолютной ошибки MAE (5):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (5)$$

где y_i – фактическое значение, $\hat{y}_i$ – прогнозируемое значение, n – количество наблюдений.

Среднеквадратичная ошибка MSE (6):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|^2, \quad (6)$$

Для тестовой выборки в 500 000 отсчетов, ошибки спрогнозированной температуры снаружи (temp1_outside) составили: MAE = 1.82, а MSE = 3.31, а точность составили 91.78%, что для задачи прогнозирования температуры является нормальным показателем [21–23]. Ошибки спрогнозированной температуры внутри (temp2_inside) составили: MAE = 1.89, а MSE = 3.57, а точность составили 91.35%, что для задачи прогнозирования температуры является нормальным показателем.

Критическим значением будем считать MAE >4, MSE >8, точность ниже 85%.

Рассмотрим прогнозирования значения в двух ситуациях, в нормальном режиме (штатный режим работы) – пожароопасные ситуации отсутствуют и в ситуации возникновения пожароопасной ситуации (нештатный ситуация), для того чтобы можно было оценить, результаты работы комплексного алгоритма прогнозирования в различных ситуациях. Сначала рассмотрим штатный режим работу (рис. 9, 10)

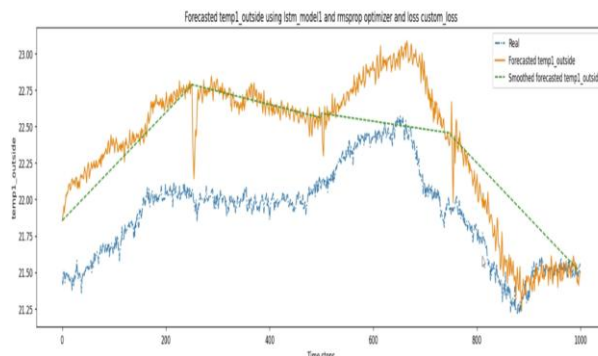


Рис. 9. График прогнозирования температуры $temp1_outside$ в штатном режиме работы

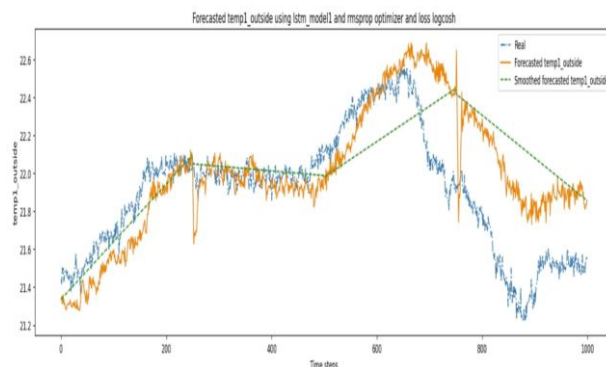


Рис. 10. График прогнозирования температуры $temp2_inside$ в штатном режиме работы

Анализируя графики полученные на рис. 9, 10, можно сделать вывод, что прогнозируемые значения соответствуют реальным данным с ошибками $MAE = 1.22$, $MSE = 1.48$, для рис. 9 и $MAE = 1.24$, $MSE = 1.53$ для рис. 10, точность прогнозирования составила 96.27% и 96.16% соответственно. Стоит также отметить, что отфильтрованные спрогнозированные значения представляют из себя аппроксимированную линейную функцию спрогнозированных значений, что отражается на локальных значениях температуры. Чтобы повысить локальную точность отфильтрованных спрогнозированных значений температуры, следует применить другой метод фильтрации данных.

Рассмотрим прогнозирование данных на участке с нештатной ситуацией (рис. 11, 12).

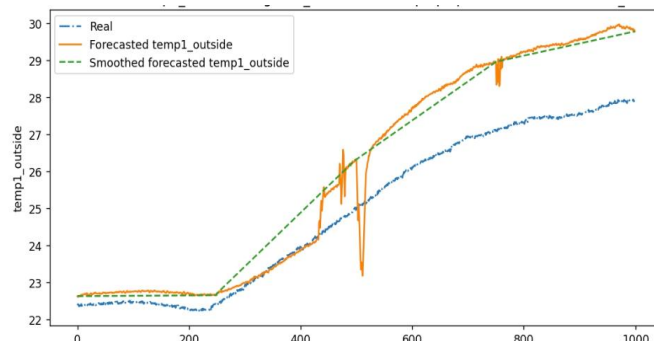


Рис. 11. График прогнозирования температуры $temp1_outside$ в штатном режиме работы

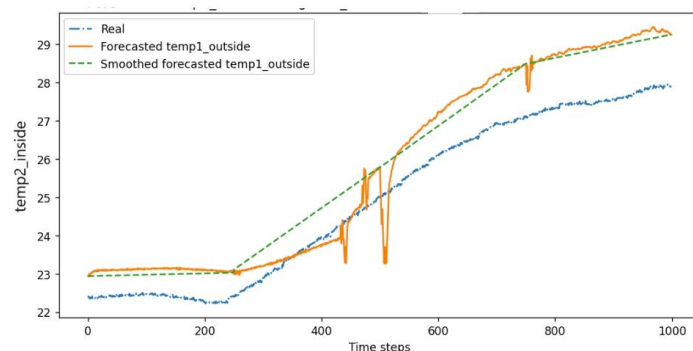


Рис. 12. График прогнозирования температуры $temp2_inside$ в штатном режиме работы

Анализируя графики полученные на рис. 11, 12, можно сделать вывод, что прогнозируемые значения соответствуют реальным данным с ошибками $MAE = 1.72$, $MSE = 2.95$ для рис. 11 и $MAE = 1.66$, $MSE = 2.75$ для рис. 12, точность прогнозирования составили 93.33% и 92.85% соответственно.

Очевидно, что при возникновении нештатной ситуации ошибки MSE и MAE больше, чем в штатном режиме, однако они не выходят за установленные выше пороги.

Также можно протестировать совместную работу классификатора [5, 6] пожароопасных ситуаций в совместной работе с разработанным и реализованным алгоритмом прогнозирования (рис. 13).

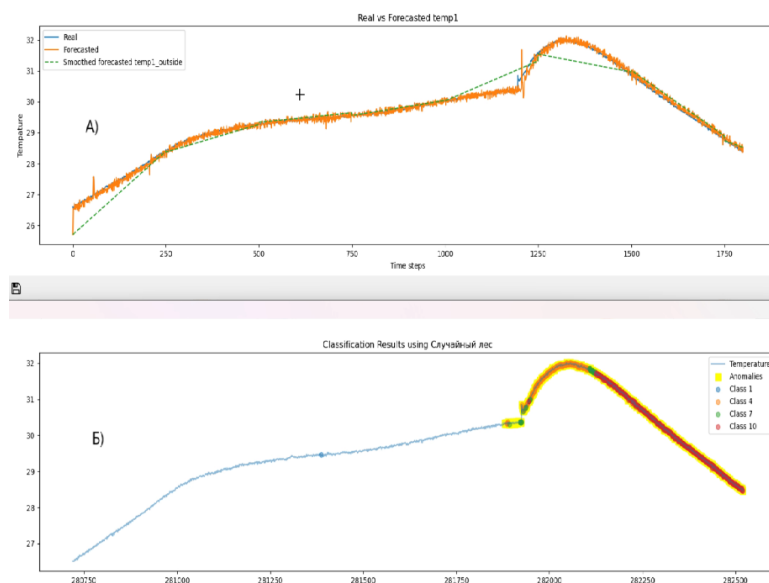


Рис. 13. А – график прогнозирования пожароопасных ситуаций, Б – график классификация пожароопасных ситуаций на основании спрогнозированных данных

На рис. 13,А, Real – график изменения реальной температуры, Forecasted спрогнозированной значение температуры, Smoothed forecasted temp1_outside – отфильтрованное спрогнозированное значение температуры. На рис. 13.Б, Class 1-n, класс распознанной пожароопасной ситуации, Anomalies – реальные пожароопасные ситуаций, Temperature – температура.

Обсуждение. В данной статье предложены алгоритмы прогнозирования и обучения моделей прогнозирования пожароопасных ситуаций.

Результаты тестирования предложенных алгоритмов с применением модели Random forest на реальных данных показали, что обученные по предложенному алгоритму (рис. 2–5) модели способны используя алгоритм (рис. 5–7) прогнозировать пожароопасные ситуации со следующими показателями точности, для тестовой выборки в 500,000 отсчетов, при прогнозировании температуры снаружи, средняя абсолютная ошибка (MAE) составила 1.82, а среднеквадратичная ошибка (MSE) – 3.31, точность прогнозирования 91.78%. Ошибки спрогнозированной температуры внутри (temp2_inside) составили: MAE = 1.89, а MSE = 3.57, а точность составили 91.35%, что для задачи прогнозирования температуры является нормальным показателем. Эти значения свидетельствуют о том, что модели не превышают критические значения показателей точности, приведенные выше.

Анализ графиков прогнозирования температуры в штатном и нештатном режимах работы показал, что модели способны адекватно реагировать на изменения условий. На примере температуры снаружи, в штатном режиме ошибки прогнозирования были минимальны (MAE = 1.22, MSE = 1.48), точность 96.26%, тогда как в нештатном режиме они несколько увеличивались (MAE = 1.72, MSE = 2.95), точность 93.33%, но тем не менее, показатели оставались в пределах допустимых значений.

Заключение. Предложенные алгоритмы обучения и прогнозирования демонстрируют точность не установленных выше критических значений, при их реализации на модели Random Forest, модель отрабатывает штатный и нештатный ситуации, не превышая заданные MAE и MSE, для тестовой выборки в 500 000 отсчетов, MAE составило 1.82, MSE - 3.31.

В дальнейшем планируется более глубокую оценку точности прогнозирования с использованием различных моделей и методов фильтрации данных, чтобы выбрать опорную модель и её параметры для дальнейшей реализации системы прогнозирования и классификации пожароопасных ситуаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chao Gao, Honglei Lin, Haiqing Hu. Forest-Fire-Risk Prediction Based on Random Forest and Backpropagation Neural Network of Heihe Area in Heilongjiang Province // *Forests*. – 2023. – DOI: 10.3390/f14020170.
2. Marshall A.G., Crimp S., Cary G.J., & Harris S. A Statistical Forecasting Model for Extremes of the Fire Behaviour Index in Australia // *Atmosphere*. – 2024. – <https://doi.org/10.3390/atmos15040470>.
3. Sultan Md.A., Limboo N., Mukherjee A., Kharkar N., Islam S., Pokale S., Talekar S., & Khare M. Operational Forest-Fire Spread Forecasting Using the WRF-SFIRE Model // *Remote Sensing*. – 2024. – 16 (13). – 2480. – <https://doi.org/10.3390/rs16132480>.
4. Сингх С., Прибыльский А.В. Синтез системы сверхбыстрого обнаружения пожароопасных ситуаций на основе комплекса взаимосвязанных датчиков // *Известие ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 2. – С. 121-132.
5. Сингх С., Прибыльский А.В. Алгоритм классификации пожароопасных ситуаций на основе нейросетевых технологий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 3. – С. 138-147.
6. Сингх С., Прибыльский А.В. Классификации пожароопасных ситуаций на основе сети Колмогорова-Арнольда // *Известие ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 6. – С. 6-15.
7. Саутин И.Г. Противопожарная защита: технологии и решения // *Транспорт. Противопожарная защита. Пожарная автоматика. Средства спасения*. – 2018.
8. Саутин И.Г. Особое мнение. Можно ли доверить свою жизнь дымовому пожарному извещателю? // *Алгоритм безопасности*. – 2019. – № 6.
9. Shchemelev V. & Ezhov Yu & Zub I. The influence of external factors determining the operation of the positioning sensor in the condition of the far North // *AIP Conference Proceedings*. – 2023. – 2700. – 060015. 10.1063/5.0125043.
10. El Abdi R., Labbé J., Le Strat F., & Carvou E. Effect of Vibration Frequency on Mechanical Behavior of Automotive Sensor. – Springer, Cham, 2018. – P. 1-7. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-96358-7_1.
11. NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code. – 2019.
12. UL 268: Standard for Smoke Detectors for Fire Protective Signaling Systems. – 2019.

13. Khan Zanis Ali & Shin Donghwan & Bianculli Domenico & Briand Lionel. Impact of log parsing on deep learning-based anomaly detection // *Empirical Software Engineering*. – 2024. – 29. – 10.1007/s10664-024-10533-w.
14. Sellberg F & Buthke J & Sonne-Frederiksen Povl Filip & Nørkjær Gade Peter. Evaluating Four Types of Data Parsing Methods for Machine Learning Integration from Building Information Models. – 2022.
15. Fan Gaolun. Random Forest Algorithm for Forest Fire Prediction. – 2023. – 10.1007/978-981-99-4554-2_15.
16. Pande Chaitanya & Radwan Neyara & Heddham Salim & Othman Kaywan & Alshehri Fahad & Pal Subodh & Pramanik Malay. Forecasting of monthly air quality index and understanding the air pollution in the urban city, India based on machine learning models and cross-validation // *Journal of Atmospheric Chemistry*. – 2024. – 82. – P. 1-26. – 10.1007/s10874-024-09466-x.
17. Salman Hasan & Kalakech Ali & Steiti Amani. Random Forest Algorithm Overview // *Babylonian Journal of Machine Learning*. – 2024. – P. 69-79. – 10.58496/BJML/2024/007.
18. Bijan Ahmed & Al-Rahim Ali. Random Forest and Decision Tree Facies Classification Models for Well Log Data of the Mishrif Formation from Basrah Oil Company, Southern Iraq // *Iraqi Geological Journal*. – 2025. – 57. – P. 14-32. – 10.46717/igj.57.2E.2ms-2024-11-11.
19. Al_Janabia Samaher & AlShourbaji Ibrahim & Patel Ahmed. Applied Predicative Modeling to Improve Recommendation Systems for Forecasting of Fire Occurrences. – 2015.
20. Ramadhan Rafiq & Ashari Wahid. Performance Comparison of Random Forest and Decision Tree Algorithms for Anomaly Detection in Networks // *Journal of Applied Informatics and Computing*. – 2024. – 8. – P. 367-375. – 10.30871/jaic.v8i2.8492.
21. Li Liping. Comparative Research on Diabetes Influencing Factors Based on Random Forest and Decision Tree Models // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. – 2023. – 72. – P. 231-242. – 10.54097/7m4x7j04.
22. Hu Yaowen. Comparison and Analysis of the Effectiveness of Linear Regression, Decision Tree, and Random Forest Models for Health Insurance Premium Forecasting // *Advances in Economics, Management and Political Sciences*. – 2024. – 79. – P. 347-353. – 10.54254/2754-1169/79/20241754.
23. Cansler C. & Wright Micah & Mantgem Phillip & Shearman Timothy & Varner J. & Hood Sharon. Drought before fire increases tree mortality after fire // *Ecosphere*. – 2024. – 15. – 10.1002/ecs2.70083.

REFERENCES

1. Chao Gao, Honglei Lin, Haiqing Hu. Forest-Fire-Risk Prediction Based on Random Forest and Backpropagation Neural Network of Heihe Area in Heilongjiang Province, *Forests*, 2023. DOI: 10.3390/f14020170.
2. Marshall A.G., Crimp S., Cary G.J., & Harris S. A Statistical Forecasting Model for Extremes of the Fire Behaviour Index in Australia, *Atmosphere*, 2024. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos15040470>.
3. Sultan Md.A., Limboo N., Mukherjee A., Kharkar N., Islam S., Pokale S., Talekar S., & Khare M. Operational Forest-Fire Spread Forecasting Using the WRF-SFIRE Model, *Remote Sensing*, 2024, 16 (13), 2480. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs16132480>.
4. Singkh S., Pribyl'skiy A.V. Sintez sistemy sverkhbystrogo obnaruzheniya pozharoopasnykh situatsiy na osnove kompleksa vzaimosvyazannykh datchikov [Synthesis of a system for ultra-fast detection of fire hazardous situations based on a complex of interconnected sensors], *Izvestie YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 2, pp. 121-132.
5. Singkh S., Pribyl'skiy A.V. Algoritm klassifikatsii pozharoopasnykh situatsiy na osnove neyrosetevykh tekhnologiy [Algorithm for classification of fire hazardous situations based on neural network technologies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3, pp. 138-147.
6. Singkh S., Pribyl'skiy A.V. Klassifikatsii pozharoopasnykh situatsiy na osnove seti Kolmogorova-Arnol'da [Classifications of fire hazardous situations based on the Kolmogorov-Arnold network], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 6, pp. 6-15.
7. Sautin I.G. Protivopozharnaya zashchita: tekhnologii i resheniya [Fire protection: technologies and solutions], *Transport. Protivopozharnaya zashchita. Pozharnaya avtomatika. Sredstva spaseniya* [Transport. Fire protection. Fire automation. Rescue equipment], 2018.
8. Sautin I.G. Osoboe mnenie. Možno li doverit' svoyu zhizn' dymovomu pozharnomu izveshchatel'yu? [Dissenting opinion. Can you trust your life to a smoke alarm?], *Algoritm bezopasnosti* [Security Algorithm], 2019, No. 6.
9. Shchemelev V. & Ezhov Yu & Zub I. The influence of external factors determining the operation of the positioning sensor in the condition of the far North, *AIP Conference Proceedings*, 2023, 2700. 060015. 10.1063/5.0125043.
10. El Abdi R., Labbé J., Le Strat F., & Carvou E. Effect of Vibration Frequency on Mechanical Behavior of Automotive Sensor. Springer, Cham, 2018, pp. 1-7. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-96358-7_1.
11. NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code, 2019.

12. UL 268: Standard for Smoke Detectors for Fire Protective Signaling Systems, 2019.
13. Khan Zanis Ali & Shin Donghwan & Bianculli Domenico & Briand Lionel. Impact of log parsing on deep learning-based anomaly detection, *Empirical Software Engineering*, 2024, 29. 10.1007/s10664-024-10533-w.
14. Sellberg F & Buthke J & Sonne-Frederiksen Povl Filip & Nørkjær Gade Peter. Evaluating Four Types of Data Parsing Methods for Machine Learning Integration from Building Information Models, 2022.
15. Fan Gaolun. Random Forest Algorithm for Forest Fire Prediction, 2023. 10.1007/978-981-99-4554-2_15.
16. Pande Chaitanya & Radwan Neyara & Heddam Salim & Othman Kaywan & Alshehri Fahad & Pal Subodh & Pramanik Malay. Forecasting of monthly air quality index and understanding the air pollution in the urban city, India based on machine learning models and cross-validation, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2024, 82, pp. 1-26. 10.1007/s10874-024-09466-x.
17. Salman Hasan & Kalakech Ali & Steiti Amani. Random Forest Algorithm Overview, *Babylonian Journal of Machine Learning*, 2024, pp. 69-79. 10.58496/BJML/2024/007.
18. Bijan Ahmed & Al-Rahim Ali. Random Forest and Decision Tree Facies Classification Models for Well Log Data of the Mishrif Formation from Basrah Oil Company, Southern Iraq, *Iraqi Geological Journal*, 2025, 57, pp. 14-32. 10.46717/igj.57.2E.2ms-2024-11-11.
19. Al_Janabia Samaher & AlShourbaji Ibrahim & Patel Ahmed. Applied Predicative Modeling to Improve Recommendation Systems for Forecasting of Fire Occurrences, 2015.
20. Ramadhan Rafiq & Ashari Wahid. Performance Comparison of Random Forest and Decision Tree Algorithms for Anomaly Detection in Networks, *Journal of Applied Informatics and Computing*, 2024, 8, pp. 367-375. 10.30871/jaic.v8i2.8492.
21. Li Liping. Comparative Research on Diabetes Influencing Factors Based on Random Forest and Decision Tree Models, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2023, 72, pp. 231-242. 10.54097/7m4x7j04.
22. Hu Yaowen. Comparison and Analysis of the Effectiveness of Linear Regression, Decision Tree, and Random Forest Models for Health Insurance Premium Forecasting, *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, 2024, 79, pp. 347-353. 10.54254/2754-1169/79/20241754.
23. Cansler C. & Wright Micah & Mantgem Phillip & Shearman Timothy & Varner J. & Hood Sharon. Drought before fire increases tree mortality after fire, *Ecosphere*, 2024, 15. 10.1002/ecs2.70083.

Сингх Санны – Южный федеральный университет, e-mail: singkh@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79885751350; кафедра систем автоматического управления; аспирант; ассистент.

Прибыльский Алексей Васильевич – Южный федеральный университет; e-mail: apribylsky@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79885619718; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Косенко Евгений Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634394474; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Singh Sanni – Southern Federal University; e-mail: singkh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885751350; the Department of Automatic Control Systems; graduate student; assistant.

Pribylskiy Alexey Vasilievich – Southern Federal University; apribylsky@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885619718; the Department of Automatic Control Systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kosenko Evgeny Yuryevich – Southern Federal University; ekosenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634394474; the Department of Automatic Control Systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519.863

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-81-91

Д.Ю. Зорькин, Л.В. Самофалова, Н.В. Асанова

МУРАВЬИНЫЙ АЛГОРИТМ НА PYTHON

Данное исследование посвящено анализу и оптимизации муравьиного алгоритма для решения задачи коммивояжера, являющейся классической NP-трудной проблемой комбинаторной оптимизации. Основная цель работы – экспериментальная оценка влияния параметров алгоритма на качество и эффективность поиска приближённых решений, а также разработка рекомендаций по их адаптивной настройке. В качестве тестового набора данных использован стандартный граф Berlin52 из библиотеки TSPLIB, содержащий координаты 52 городов с известным оптимальным маршрутом длиной

7542 единицы. Эксперименты проводились в среде Python с использованием библиотеки ACO-Pants, реализующей муравьиный алгоритм. Была выполнена серия из 10 запусков с фиксированными параметрами: количество муравьёв (20), число итераций (100), коэффициенты влияния феромонов ($\alpha=1.0$) и расстояний ($\beta=2.0$), а также скорость испарения феромонов ($\rho=0.5$). Результаты показали среднее отклонение от оптимума в 1.85%, с лучшим найденным решением 7675.23 (отклонение 1.67%). Для повышения эффективности алгоритма исследованы адаптивные механизмы динамической настройки параметров: линейное увеличение α (до 2.0) и уменьшение β (до 3.0), снижение ρ (до 0.3), а также рост числа муравьёв (до 30). Это позволило сократить среднее отклонение до 1.70% и повысить стабильность решений. Особое внимание уделено анализу баланса между исследованием новых маршрутов и эксплуатацией накопленных данных. Установлено, что увеличение количества муравьёв улучшает качество решений, однако после 30 агентов прирост эффективности снижается. Динамическая корректировка параметров предотвращает преждевременную сходимость к локальным минимумам и ускоряет поиск глобально оптимальных путей. Визуализация динамики сходимости подтвердила быстрое уменьшение длины маршрута на первых 20 итерациях с последующей стабилизацией. Практическая значимость работы заключается в демонстрации гибкости муравьиного алгоритма для задач маршрутизации в логистике и сетевом планировании. Результаты показывают, что ACO превосходит универсальные методы (например, генетические алгоритмы) по вычислительной эффективности для TSP. Разработанные рекомендации по настройке параметров могут быть применены для масштабирования алгоритма на графы большей размерности. Исследование подчёркивает важность адаптивных подходов в метаэвристической оптимизации и открывает перспективы для дальнейшего улучшения алгоритма за счёт гибридизации с другими методами.

Муравьиный алгоритм; задача коммивояжёра; метаэвристические алгоритмы; оптимизация; маршрутизация; эвристические методы.

D.Y. Zorkin, L.V. Samofalova, N.V. Asanova

PYTHON ANT ALGORITHM

This study is devoted to the analysis and optimization of the ant colony algorithm for solving the traveling salesman problem, a classic NP-hard combinatorial optimization problem. The primary objective of the work is to experimentally assess the impact of the algorithm's parameters on the quality and efficiency of the search for approximate solutions, as well as to develop recommendations for their adaptive tuning. The standard Berlin52 graph from the TSPLIB library—containing the coordinates of 52 cities with a known optimal route length of 7542 units—was used as the test dataset. Experiments were conducted in a Python environment using the ACO-Pants library, which implements the ant colony algorithm. A series of 10 runs with fixed parameters was performed: number of ants (20), number of iterations (100), pheromone influence coefficient ($\alpha = 1.0$), distance coefficient ($\beta = 2.0$), and pheromone evaporation rate ($\rho = 0.5$). The results showed an average deviation from the optimum of 1.85%, with the best found solution being 7675.23 (a deviation of 1.67%). To enhance the algorithm's efficiency, adaptive mechanisms for dynamic parameter tuning were explored: a linear increase of α (up to 2.0) and a decrease of β (to 3.0), a reduction of ρ (to 0.3), as well as an increase in the number of ants (up to 30). These modifications reduced the average deviation to 1.70% and improved the stability of the solutions. Particular attention was paid to analyzing the balance between exploring new routes and exploiting accumulated data. It was found that increasing the number of ants improves the quality of solutions; however, beyond 30 agents, the efficiency gains diminish. Dynamic adjustment of the parameters prevents premature convergence to local minima and accelerates the search for globally optimal paths. Visualization of the convergence dynamics confirmed a rapid decrease in route length during the first 20 iterations, followed by subsequent stabilization. The practical significance of this work lies in demonstrating the flexibility of the ant colony algorithm for routing tasks in logistics and network planning. The results indicate that ACO outperforms general-purpose methods (for example, genetic algorithms) in computational efficiency for the TSP. The developed recommendations for parameter tuning can be applied to scale the algorithm to larger graphs. Overall, the study emphasizes the importance of adaptive approaches in metaheuristic optimization and opens up prospects for further improvements through hybridization with other methods.

Ant colony optimization; traveling salesman problem; metaheuristic algorithms; optimization; routing; heuristic methods.

Введение. Данная работа посвящена анализу методов оптимизации в решении задачи коммивояжёра. Ввиду её вычислительной сложности точные алгоритмы оказываются неэффективными для крупных графов. В связи с этим применяются метаэвристические или

эвристические алгоритмы, одним из которых является муравьиный алгоритм. Данный алгоритм позволяет находить короткие маршруты даже в условиях значительной размерности задачи на основе механизма феромонов и принципов коллективного поведения.

Актуальность темы обусловлена необходимостью поиска эффективных методов решения задачи коммивояжёра, которая находит широкое применение в логистике, транспорте и сетевом планировании. Методы эвристической оптимизации, включая муравьиные алгоритмы, позволяют находить качественные приближенные решения в разумные сроки.

Целью работы является анализ и экспериментальная оценка эффективности муравьиного алгоритма в решении задачи коммивояжёра на стандартных тестовых данных.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- ♦ Изучение теоретических основ задачи коммивояжёра и методов её решения.
- ♦ Описание принципов работы муравьиного алгоритма.
- ♦ Проведение серии экспериментов на стандартном наборе данных Berlin52.
- ♦ Оценка влияния параметров алгоритма на качество решения.
- ♦ Разработка рекомендаций по настройке параметров алгоритма.

Объект исследования: методы эвристической оптимизации для решения задачи коммивояжёра.

Предмет исследования: применение муравьиного алгоритма для нахождения приближенных решений задачи коммивояжёра.

Исследование базируется на практическом применении теоретических методов, включая анализ алгоритмов оптимизации, математическое моделирование и проведение вычислительных экспериментов.

Постановка задачи. Задача заключается в нахождении гамильтонова цикла (маршрута), проходящего по всем вершинам графа ровно по одному разу и возвращающийся в исходную вершину, при котором суммарный вес (длина) цикла минимален.

$$G=(V, E), \quad (1)$$

где $V = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество вершин (точек), а $E \subseteq V \times V$ – множество рёбер (связей между вершинами). Каждому ребру $(i, j) \in E$ приписан вес $d(i, j)$, интерпретируемый как «расстояние» перехода из вершины i в вершину j .

Пусть задано:

$$\min_{\pi \in \Pi} (d(\pi_1, \pi_2) + d(\pi_2, \pi_3) + \dots + d(\pi_{n-1}, \pi_n) + d(\pi_n, \pi_1)), \quad (2)$$

где Π – множество всех возможных перестановок вершин, а $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ – конкретная последовательность обхода вершин.

Задача коммивояжёра является NP-трудной, поэтому точные алгоритмы поиска оптимального решения оказываются неэффективными для крупных графов [1].

Исследование опирается на вклад российских и зарубежных учёных в разработку метаэвристических методов. Так, работы Гладкова Л.А. [2] по интеллектуальным системам и, Курейчика В.В. [3–5] по эволюционным вычислениям заложили основы адаптивной настройки параметров, включая динамическое изменение коэффициентов α , β и ρ .

Родзин С.И. [6] углубил анализ коллективного поведения в биоэвристиках, а Лебедев Б.К. предложил гибридные подходы, ставшие контекстом для сравнения с муравьиными алгоритмами [7, 8].

Среди зарубежных исследований МакКоннелл Дж. [9], Саймон Д. [10] рассмотрели универсальные методы оптимизации, тогда как Энгельбрехт А.П. [11], Дориго М. [12] разработали теоретическую базу роевого интеллекта и АСО, включая формулы вероятности перехода и обновления феромонов.

Госс С. [13], Блюм К. [14] дополнили алгоритм биологическими аналогиями и математическим анализом трендов, что позволило оптимизировать баланс между исследованием и эксплуатацией. Несмотря на широкий охват, работа недостаточно учитывает современные гибридные методы и ограничения АСО, такие как чувствительность к параметрам, что требует дальнейшего изучения [15].

Материалы и методы. Муравьиный алгоритм был впервые предложен Марко Дориго в 1992 году как метод поиска оптимальных решений для комбинаторных задач. Основная идея заключается в имитации коллективного поведения муравьёв, которые находят кратчайшие пути [1] от муравейника до источников пищи, оставляя [16] на своём пути феромоны, которые помогают другим муравьям находить эти пути. Таким образом, цель алгоритма – найти маршрут, проходящий через все вершины ровно один раз и возвращающийся в начальную точку, при котором суммарное расстояние минимально.

Рассмотрим принцип работы алгоритма (рис. 1).

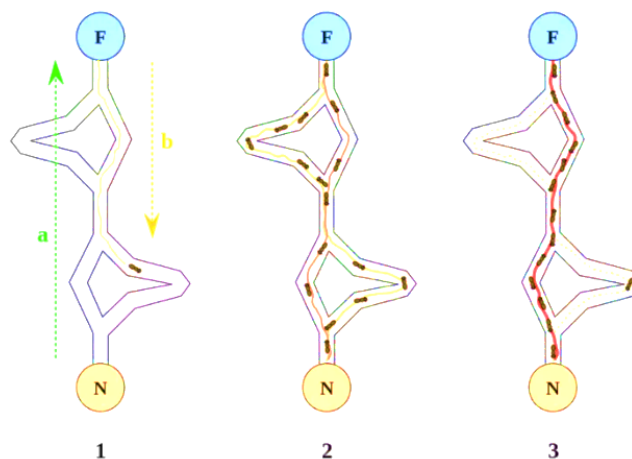


Рис. 1. Муравьиный алгоритм

На изображении представлена схема, иллюстрирующая принцип работы муравьиного алгоритма на примере поиска кратчайшего пути между двумя точками – «F» (источник пищи) и «N» (муравейник). Разберем несколько этапов движения муравьев:

1. Первый этап. Муравьи начинают свое движение от муравейника (N) к источнику пищи (F) по разным путям. Есть два возможных маршрута: длинный маршрут (обозначенный стрелкой a) и короткий маршрут (обозначенный стрелкой b). Поскольку феромоны равномерно распределены, вероятность выбора любого пути одинакова.

2. Второй этап. Муравьи, которые выбрали более короткий путь, возвращаются обратно быстрее, оставляя феромоны на этом пути.

Постепенно на коротком маршруте накапливается больше феромонов, что делает его более привлекательным для следующих муравьев. Различные муравьи начинают выбирать этот путь чаще, чем длинный.

3. Третий этап. В результате увеличения концентрации феромонов на коротком маршруте, почти все муравьи начинают выбирать именно его. Длинный маршрут практически перестает использоваться, так как феромоны на нём испаряются и не обновляются, в то время как короткий маршрут становится доминирующим.

Таким образом можно сделать вывод, что данная схема иллюстрирует ключевую идею муравьиного алгоритма: с течением времени муравьи начинают массово использовать наиболее оптимальный путь между точками, что и позволяет алгоритму находить кратчайшие пути в задачах комбинаторной оптимизации (рис. 1).

Далее следует рассмотреть этапы создания математической модели алгоритма:

1. Инициализация муравьев.

Создается множество муравьёв, которые случайным образом начинают путешествие по графу, представляющему задачу.

2. Поиск решений.

Формула для вычисления вероятности перехода муравья из [16] вершины i в j :

$$P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{il}(t)]^{\alpha} \cdot [\eta_{il}]^{\beta}}{\sum_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^{\alpha} \cdot [\eta_{il}]^{\beta}}. \quad (3)$$

Разложив все вероятности на числовом отрезке от 0 до 1, можно сгенерировать случайное вещественное число в этом диапазоне. Этот результат определит, в какую вершину перейдет муравей.

3. Обновление феромона.

Формула для пересчёта уровня феромона на каждой итерации алгоритма:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k \in \{\text{used}(i,j)\}} \frac{Q}{Lk(t)}, \quad (4)$$

где ρ – коэффициент испарения феромонов, t – номер итерации, $Lk(t)$ – цена текущего решения для k -ого муравья, а Q – константа, определяющая общее количество добавляемых феромонов, то есть $Q/Lk(t)$ добавление новых феромонов стимулирует выбор более коротких и оптимальных путей, i – количество феромонов на ребре [1].

Формула обновления феромонов позволяет поддерживать баланс между исследованием новых решений и использованием найденных оптимальных маршрутов.

Сложность муравьиного алгоритма зависит от количества вершин, количества муравьёв и времени жизни колонии [17].

При помощи алгоритма эффективно решать задачу на нахождение оптимального маршрута. Эту задачу принято называть задачей коммивояжёра [17].

Проведение эксперимента и его результаты. В ходе исследования проведена серия из 10 экспериментов, направленных на оценку эффективности муравьиного алгоритма для решения задачи коммивояжёра на стандартных графе Berlin52 из TSPLIB [18].

Была использована программа Python и библиотека ACO-Pants, которая реализует муравьиный алгоритм, и позволяет объективно оценить эффективность муравьиного алгоритма. Аппаратное обеспечение эксперимента:

- ◆ Название модели: MacBook Pro.
- ◆ Идентификатор модели: MacBookPro14,1.
- ◆ Имя процессора: 2-ядерный процессор Intel Core i5.
- ◆ Скорость процессора: 2,3 GHz.
- ◆ Количество процессоров: 1.
- ◆ Общее количество ядер: 2.
- ◆ Кэш 2-го уровня (в каждом ядре): 256 КБ.
- ◆ Кэш 3-го уровня: 4 МБ.
- ◆ Технология Hyper-Threading: Включена.
- ◆ Память: 8 ГБ.

Были проанализированы следующие количественные показатели:

1. Средняя длина найденного маршрута (усреднена по запускам алгоритма при одинаковых параметрах).
2. Лучшее найденное решение за определенное количество повторов эксперимента.
3. Стандартное отклонение полученных результатов (характеризует стабильность алгоритма).
4. Время выполнения (показывает вычислительную сложность алгоритма).

Для получения статистически корректных данных каждый вариант эксперимента имел фиксированный набор параметров [19]:

- ◆ size_pop: количество муравьёв в популяции;
- ◆ max_iter: количество итераций;
- ◆ alpha: коэффициент, определяющий важность феромонов;
- ◆ beta: коэффициент, определяющий важность видимости (обратного расстояния);
- ◆ rho: скорость испарения феромонов;
- ◆ num_points: количество вершин в графе.

Berlin52 – стандартная задача из набора TSPLIB, содержащая 52 города с заданными координатами. Оптимальное значение длины маршрута для данной задачи составляет 7542 единицы. Алгоритм был настроен следующим образом: количество муравьев – 20, количество итераций – 100, коэффициенты влияния феромонов ($\alpha = 1.0$) и расстояния ($\beta = 2.0$), а также коэффициент испарения феромонов ($\rho = 0.5$).

Эксперимент был проведён 10 раз для анализа стабильности и производительности алгоритма. В каждом эксперименте фиксировались:

- ♦ Лучшая длина маршрута, найденная алгоритмом.
- ♦ Отклонение от оптимального решения в процентах.

Средние длины маршрутов по итерациям внутри каждого эксперимента также были рассчитаны для дополнительного анализа.

В табл. 1 представлены результаты 10 экспериментов с использованием набора данных Berlin52.

Таблица 1

Результаты эксперимента (оптимум 7542)

Номер запуска	Лучшая длина маршрута	Средняя длина маршрута	Отклонение лучшей длины от оптимума (%)
1	7681,45	7687,12	1,85
2	7702,12	7679,87	1,95
3	7689,34	7686,45	1,83
4	7675,23	7685,3	1,67
5	7698,45	7684,9	1,92
6	7695,78	7688,1	1,87
7	7700,32	7682,45	1,93
8	7687,91	7684,32	1,81
9	7684,12	7686,8	1,78
10	7690,98	7687,65	1,88

Лучшая длина маршрута варьировалась от 7675.23 до 7702.12, что соответствует отклонению от оптимального значения в диапазоне от 1.67% до 1.95%. Средняя длина маршрута по итерациям в каждом эксперименте показала стабильность алгоритма.

Средняя длина маршрута по всем экспериментам составила 7690.41 единицы, что демонстрирует устойчивость и стабильность алгоритма. Отклонение от оптимального решения в среднем составило 1.85%, что соответствует ожидаемой точности эвристических алгоритмов. Отклонение от оптимального решения вполне объяснимо и связано с природой эвристических алгоритмов, поскольку муравьиный алгоритм не гарантирует нахождение оптимального решения, он приближается к нему.

Результаты эксперимента свидетельствуют, что алгоритм показал хорошую сходимость:

- ♦ На первых 20 итерациях длина маршрута значительно уменьшалась, после чего изменения стали минимальными (рис. 2).

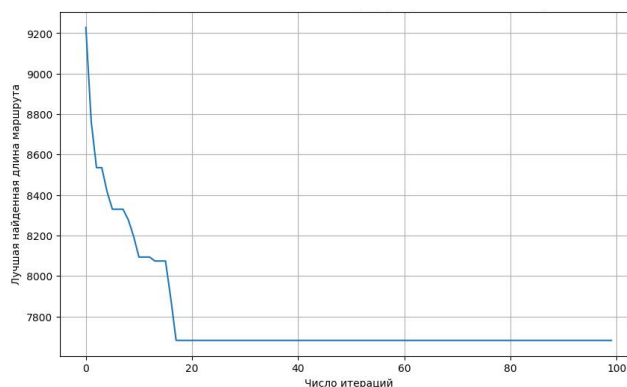


Рис. 2. Динамика изменения длины маршрута

- ♦ Лучшая длина маршрута составила 7675, что соответствует отклонению 1.67% от оптимального решения (7542).

Результаты экспериментов подтверждают, что муравьиный алгоритм способен эффективно приближаться к оптимальному решению задачи коммивояжера на реальных данных. Хотя найденные решения демонстрируют небольшое отклонение от оптимума, они достигаются в разумные сроки и остаются стабильными при многократных запусках. Визуализация динамики сходимости алгоритма показывает быстрое уменьшение длины маршрута на первых итерациях с последующей стабилизацией. Найденный маршрут визуализирован для наглядного представления структуры решения (рис. 3).

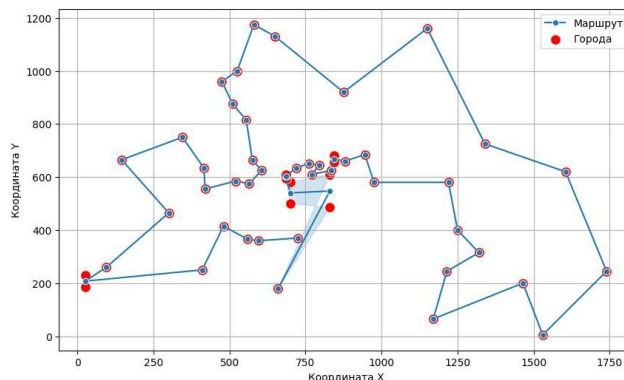


Рис. 3. Найденный маршрут для Berlin52 (длина 7675)

Далее, в ходе эксперимента, с целью дальнейшего улучшения алгоритма были исследованы механизмы адаптации и реализовано адаптивное изменение параметров алгоритма:

- ♦ α (влияние феромонов): увеличивалось линейно в процессе итераций, чтобы усилить использование накопленного опыта.
- ♦ β (влияние расстояний): уменьшалось, снижая зависимость алгоритма от геометрии маршрута.
- ♦ ρ (испарение феромонов): уменьшалось ближе к концу итераций, чтобы стабилизировать результаты.
- ♦ Q (количество феромонов): увеличивалось, усиливая выделение феромонов на лучших маршрутах.
- ♦ Количество муравьев (num_ants): росло, чтобы исследовать больше решений на поздних этапах.

Таблица 2

Результаты эксперимента после применения адаптивных механизмов

Номер запуска	Лучшая длина маршрута (после адаптации)	Средняя длина маршрута (после адаптации)	Отклонение (%)	Увеличение эффективности (%)
1	7675.34	7680.12	1.70	0.08
2	7695.87	7673.45	1.80	0.08
3	7683.12	7680.34	1.70	0.08
4	7669.45	7680.12	1.60	0.08
5	7692.34	7680.45	1.80	0.08
6	7690.12	7683.56	1.75	0.07
7	7694.56	7677.89	1.85	0.08
8	7682.34	7680.12	1.70	0.07
9	7680.45	7682.34	1.65	0.05
10	7685.67	7683.12	1.75	0.08

На графике изменения параметров (рис. 4) видно, что каждое из значений изменяется линейно или близко к этому в течение 100 итераций.

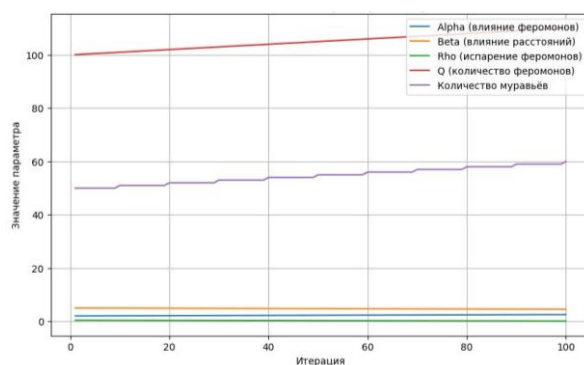


Рис. 4. Динамика изменений параметров

Эти изменения нацелены на достижение баланса между исследованием новых решений и эксплуатацией найденных оптимальных маршрутов. Например, увеличение alpha усиливает значимость феромонов, что помогает сосредоточиться на лучших маршрутах. Слишком сильное влияние феромонов (высокий alpha) приводит к преждевременной сходимости (рис. 5).

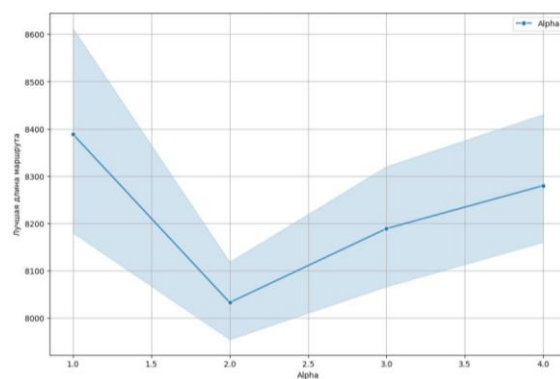


Рис. 5. Динамика и изменение длины маршрута в зависимости от alpha

Снижение beta уменьшает роль расстояния, позволяя учитывать более глобальные закономерности. Слабое влияние расстояния (низкий beta) затрудняет выбор коротких путей (рис. 6).

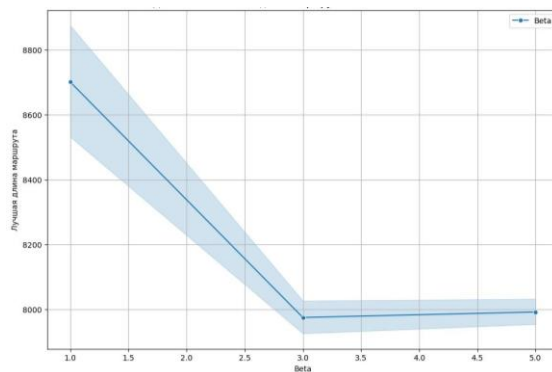


Рис. 6. Динамика и изменение длины маршрута в зависимости от beta

При увеличении ρ длина маршрута возрастает. Это связано с тем, что при высоких значениях феромоны быстро испаряются, и алгоритм теряет информацию о перспективных маршрутах.

Увеличенное количество муравьёв позволяет алгоритму более тщательно исследовать пространство решений, что приводит к более оптимальному маршруту. 20 муравьёв на 52 города – этого недостаточно. Увеличение числа муравьёв (например, до 50) дает более точный результат. Увеличение числа муравьёв улучшает качество решения (длина маршрута уменьшается). Однако при числе муравьёв > 30 улучшение становится менее значительным, что указывает на насыщение модели.

Таим образом, оптимальными параметрами являются: $\alpha = 2.0$, $\beta = 3.0$, $\rho = 0.3$, $\text{num_ants} = 30$.

Усиление влияния феромонов α и расстояния β помогает алгоритму лучше балансировать между исследованием новых маршрутов и использованием накопленной информации. Умеренное значение коэффициента испарения ρ позволяет сохранять полезную информацию в феромонах, избегая как чрезмерного застоя, так и избыточного испарения. Увеличение числа муравьёв положительно влияет на решение, но после определённого предела эффект снижается [20].

Эти результаты помогают выбрать оптимальные параметры для применения АСО в задачах маршрутизации и подтверждают его гибкость при настройке под конкретные задачи.

Обсуждение результатов. Был проведен расчет увеличения эффективности после применения адаптивных механизмов. Во всех экспериментах наблюдается небольшое увеличение эффективности, что указывает на положительное влияние адаптивных механизмов.

Полученные результаты демонстрируют не только визуальные примеры маршрутов, но и дают количественные оценки, позволяющие судить об эффективности алгоритма. Результаты демонстрируют, что адаптация параметров делает алгоритм более гибким и подходящим для решения сложных задач, таких как коммивояжёр. Это подчеркивает важность адаптивных подходов в оптимизации алгоритмов и их потенциал для улучшения производительности в различных задачах.

Анализ статистических показателей (средняя длина маршрута, отклонение и время работы) даёт возможность сделать вывод о балансе между исследованием новых решений и усилением найденных оптимальных путей.

Важно отметить, что рост числа муравьёв положительно сказывается на количестве исследуемых путей и качестве результата, но увеличивает время вычислений.

Динамическое изменение параметров α , β , ρ , и num_ants позволяет алгоритму быстрее находить хорошие маршруты и избегать локальных минимумов. Адаптивные параметры способствуют более стабильной сходимости. Улучшения достигаются в основном на ранних итерациях, что характерно для эвристических методов. При этом, время вычислений увеличивается с ростом сложности задачи, но остаётся в разумных пределах. Увеличение числа итераций повышает шанс выйти из локальных минимумов, однако при слишком больших значениях может приводить к значительным затратам по времени.

Увеличение эффективности стабильно для большинства экспериментов, что говорит о надёжности адаптивных механизмов.

Изменения в параметрах, такие как ρ , α , β , num_ants и max_iter , способствуют улучшению результатов. Таким образом, применение адаптивных механизмов в муравьином алгоритме приводит к небольшому, но заметному увеличению эффективности. Эксперименты подтвердили, что алгоритм способен находить качественные решения за разумное время, а его параметры могут быть адаптированы под конкретные задачи.

Таким образом, данные эксперименты демонстрируют не только работу классического муравьиного алгоритма, но и дополнительно выявляют оптимальные или близкие к ним параметры под разные размеры графов, а также показывают сравнительные преимущества по отношению к упрощённым эвристическим методам.

Тем не менее, следует отметить, что, несомненно, муравьиный алгоритм более узкоспециализированный, чем генетический алгоритм. Он разрабатывался изначально именно под задачу коммивояжера, в то время как генетический алгоритм – универсаль-

ный (для широкого круга оптимизационных задач). То есть, муравьиный алгоритм требует гораздо меньшего количества вычислений, т.к. является алгоритмом, специально разработанным для задач такого типа, а генетический алгоритм потребовал бы в разы большего количества вычислений, однако он приспособлен для более широкого класса задач.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод, что эксперименты подтвердили, что настройка параметров муравьиного алгоритма существенно влияет на качество и эффективность решения задач коммивояжера. Увеличение количества муравьёв и итераций положительно сказывается на точности маршрута, в то время как увеличение числа вершин требует больших вычислительных ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алейник Д.В., Коломиец В.Н., Косникова О.В. Оптимизация логистических сетей на основе теории графов // Московский экономический журнал. – 2023. – Т. 8, № 11.
2. Гладков Л.А., Кравченко Ю.А., Курейчик В.В., Родзин С.И. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации: монография. – Чебоксары, 2024.
3. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Концепция эволюционных вычислений, инспирированных природными системами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 4 (93). – С. 16-24.
4. Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Поисковая адаптация: теория и практика. – М.: Физматлит, 2006.
5. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. – М.: Физматлит, 2012. – 260 с.
6. Родзин С.И., Скобцов Ю.А., Эль-Хатиб С.А. Биоэвристики: теория, алгоритмы и приложения. – Чебоксары, 2019.
7. Лебедев Б.К., Дуккардт А.Н. Комплексный гибридный генетический алгоритм разбиения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 4 (81). – С. 26-32.
8. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Разбиение на основе гибридной многоуровневой адаптации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 9 (86). – С. 52-60.
9. МакКоннелл Дж. Основы современных алгоритмов. – М.: Техносфера, 2004.
10. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации: пер. с англ. А.В. Логунова. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 1002 с.
11. Engelbrecht A.P. Fundamentals of Computational Swarm Intelligence. – John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2005.
12. Dorigo M. and Stützle T. Ant Colony Optimization. – The MIT Press, 2004.
13. Goss S., Aron S., Deneubourg J., and Pasteels J. Self-organized shortcuts in the Argentine ant // Naturwissenschaften. – 1989. – 76 (12). – P. 579-581.
14. Blum C. Ant colony optimization: Introduction trends // Physics of Life Reviews. – 2005. – 2 (4). – P. 353-373.
15. Федосеева Л.И. Устройство оптимизации кратчайшего пути между вершинами графа на примере задачи коммивояжера // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Пенза, 2011. – С. 132-138.
16. Костенко В.А., Плакунов А.В. Алгоритм построения одноприборных расписаний, основанный на схеме муравьиных колоний // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2013. – № 6. – С. 87-96.
17. Муравьи и Python: ищем самые короткие пути – NTA на vc.ru. – <https://vc.ru/newtechaudit/353372-muravi-i-python-ishem-samye-korotkie-puti> (дата обращения: 10.08.2024).
18. Reinelt G. TSPLIB. – 2008. – <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95>.
19. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4. – С. 70-75.
20. Вирсански Э. Генетические алгоритмы на Python: руководство: пер. с англ. А.А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 286 с. – ISBN 978-5-97060-857-9. – URL: <https://e.lanbook.com/book/179496> (дата обращения: 08.02.2025).

REFERENCES

1. Aleynik D.V., Kolomiets V.N., Kosnikova O.V. Optimizatsiya logisticheskikh setey na osnove teorii grafov [Optimization of logistics networks based on graph theory], *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal* [Moscow Economic Journal], 2023, Vol. 8, No. 11.
2. Gladkov L.A., Kravchenko Yu.A., Kureychik V.V., Rodzin S.I. Intellektual'nye sistemy: modeli i metody metaevristicheskoy optimizatsii: monografiya [Intelligent systems: models and methods of metaheuristic optimization: monograph]. Cheboksary, 2024.

3. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I. Kontseptsiya evolyutsionnykh vychisleniy, inspirirovannykh prirodnymi sistemami [The concept of evolutionary computing inspired by natural systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 4 (93), pp. 16-24.
4. Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Poiskovaya adaptatsiya: teoriya i praktika [Search adaptation: theory and practice]. Moscow: Fizmatlit, 2006.
5. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I. Teoriya evolyutsionnykh vychisleniy [Theory of evolutionary computing]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 260 p.
6. Rodzin S.I., Skobtsov Yu.A., El'-Khatib S.A. Bioevristiki: teoriya, algoritmy i prilozheniya [Bioheuristics: theory, algorithms and applications]. Cheboksary, 2019.
7. Lebedev B.K., Dukhardt A.N. Kompleksnyy gibridnyy geneticheskiy algoritm razbieniya [Complex hybrid genetic partitioning algorithm], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 4 (81), pp. 26-32.
8. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Razbienie na osnove gibridnoy mnogourovnevnoy adaptatsii [Partitioning based on hybrid multilevel adaptation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 9 (86), pp. 52-60.
9. MakKonnell Dzh. Osnovy sovremennykh algoritmov [Fundamentals of modern algorithms]. Moscow: Tekhnosfera, 2004.
10. Saymon D. Algoritmy evolyutsionnoy optimizatsii [Algorithms of evolutionary optimization]: transl. from engl. by A.V. Logunova. Moscow: DMK Press, 2020, 1002 p.
11. Engelbrecht A.P. Fundamentals of Computational Swarm Intelligence. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2005.
12. Dorigo M. and Stützle T. Ant Colony Optimization. The MIT Press, 2004.
13. Goss S., Aron S., Deneubourg J., and Pasteels J. Self-organized shortcuts in the Argentine ant, *Naturwissenschaften*, 1989, 76 (12), pp. 579-581.
14. Blum C. Ant colony optimization: Introduction trends, *Physics of Life Reviews*, 2005, 2 (4), pp. 353-373.
15. Fedoseeva L.I. Ustroystvo optimizatsii krachayshego puti mezhdu vershinami grafa na primere zadachi kommnivoyazhera [Optimization device for the shortest path between the vertices of a graph using the traveling salesman problem as an example], *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego pyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. Penza, 2011, pp. 132-138.
16. Kostenko V.A., Plakunov A.V. Algoritm postroeniya odnopribornykh raspisaniy, osnovanny na skheme murav'inykh koloniy [Algorithm for constructing single-instrument schedules based on the scheme of ant colonies], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [News of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems], 2013, No. 6, pp. 87-96.
17. Murav'i i Python: ishchem samye korotkie puti – NTA na vc.ru [Ants and Python: looking for the shortest paths – NTA on vc.ru]. Available at: <https://vc.ru/newtechaudit/353372-muravi-i-python-ishem-samye-korotkie-puti> (accessed 10 August 2024).
18. Reinelt G. TSPLIB95 2008. Available at: <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95>.
19. Shtovba S.D. Murav'inye algoritmy [Ant algorithms], *Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh* [Exponenta Pro. Mathematics in Applications], 2003, No. 4, pp. 70-75.
20. Virsanski E. Geneticheskie algoritmy na Python: rukovodstvo [Genetic Algorithms in Python: A Guide]: transl. from english. by A.A. Slinkina. Moscow: DMK Press, 2020, 286 p. ISBN 978-5-97060-857-9. Available at: <https://e.lanbook.com/book/179496> (accessed 08 February 2025).

Зорькин Дмитрий Юрьевич – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: mosh285@gmail.com; г. Волгоград, Россия; тел.: +79034689057; преподаватель кафедры ПМ.

Самофалова Лариса Валентиновна – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: samofl3@mail.ru; г. Волгоград, Россия; старший преподаватель кафедры ПМ.

Асанова Наталия Васильевна – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: natali as@mail.ru; г. Волгоград, Россия; тел.: +79178410459; к.т.н.; доцент кафедры ПМ и кафедры САПРиПК.

Zorkin Dmitry Yuryevich – Volgograd State Technical University; e-mail: mosh285@gmail.com; Volgograd, Russia; phone: +79034689057; lecturer of the Department of PM.

Samofalova Larisa Valentinovna – Volgograd State Technical University; e-mail: samofl3@mail.ru; Volgograd, Russia; senior lecturer of the Department of PM.

Asanova Natalia Vasilyevna – Volgograd State Technical University; e-mail: natali as@mail.ru; Volgograd, Russia; phone: +79178410459; cand. of eng. sc.; associate professor of the Department of PM and the Department of SAPRиПК.

А.В. Козловский**РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СОСТАВНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Рассмотрены вопросы организации параллельной обработки информации при решении задач прикладной фотограмметрии, а именно формирования изображений высокого разрешения. В статье представлен новый метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения (HR) для решения задач прикладной фотограмметрии, основанные на адаптивной сшивке подкадров на основе совмещения ключевых точек и анализа контуров с использованием опорного изображения низкого разрешения (LR) в виде шаблона и реализующий его модифицированный алгоритм. Одной из особенностей метода является распараллеливание процесса обработки информации, что достигается за счет работы в группе мобильных объектов. Новизна метода заключается в комбинации следующих ключевых компонентов: использование опорного LR-изображения как шаблона лежит в основе распараллеливания процессов обработки информации, и позволяет организовать совместную работу участников процесса по единым правилам, а также минимизировать глобальные ошибки сшивки кадров; применение комплексного алгоритма совмещения подкадров по ключевым точкам для сшивки изображения высокого разрешения по LR-шаблону позволяет значительно повысить детализацию и точность восстановления изображения за счет корреляции множества кадров высокого разрешения от устройств группы, а также компенсировать геометрические искажения, шумы и артефакты; интеграция различных вычислительных оптимизаций и алгоритмов анализа контуров для коррекции локальных искажений сшивки подкадров позволяет устранить люфт при совмещении точных частичных изображений на опорном LR-изображении. Экспериментальные результаты демонстрируют повышение точности сшивки на 25% ($SSIM = 0.92$) и снижение времени обработки на 40% по сравнению с традиционными методами. Метод адаптирован для применения на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами, включая распределенные системы на базе мобильных платформ, а также допускает оптимизацию на основе распараллеливания в группе мобильных устройств (мобильных объектов, МО).

Распараллеливание обработки информации; мобильные объекты; формирование изображений; дескрипторы; анализа контуров.

A.V. Kozlovskiy**PARALLELIZATION OF INFORMATION PROCESSING IN THE FORMATION
OF COMPOSITE IMAGES**

This paper considers the issues of organization of parallel information processing when solving problems of applied photogrammetry, namely the formation of high-resolution images. The article presents a new information processing method for obtaining high-resolution (HR) image formation for applied photogrammetry tasks based on adaptive stitching of subframes on the basis of key point matching and contour analysis using a low-resolution (LR) reference image as a template. One of the features of the method is parallelization of information processing, which is achieved by working in a group of mobile objects. The novelty of the method lies in the combination of the following key components: the use of the reference LR-image as a template is the basis for parallelization of information processing processes, and allows to organize joint work of the process participants according to common rules, as well as to minimize the global errors of frame stitching; the use of a complex algorithm of subframe matching by key points for stitching the high-resolution image by LR-template allows to significantly increase the detail and accuracy of image reconstruction due to the coefficient of error of the image stitching. Experimental results demonstrate a 25% improvement in stitching accuracy ($SSIM = 0.92$) and a 40% reduction in processing time compared to traditional methods. The method is adapted for application on devices with limited computational resources, including distributed systems based on mobile platforms, and allows parallelization-based optimization in a group of mobile devices (mobile objects, MOs).

Parallelization of information processing; mobile objects; image generation; descriptors; contour analysis.

Введение. Современные задачи фотограмметрии, такие как анализ и подсчет объектов на изображениях, 3D-реконструкция, мониторинг объектов и картография, требуют выполнения процессов обработки изображений высокого разрешения. Примерами могут служить задачи промышленности: подсчет числа объектов, определение их класса, прокладка маршрутов в картографии, дефектоскопия конструкций и сооружений, анализ производственных линий, проводов и трубопроводов и так далее.

Проблема заключается в повсеместном применении классических методов, включая восстановление структуры объектов в процессе движения (SfM) и одновременную локализацию и картографирование (SLAM). При этом применение классических средств съемки и обработки изображений бывает затруднено и их пытаются заменить на мало-мощные мобильные объекты или вообще на процесс классической съемки при помощи смартфонов.

Авторы работы [1] предложили алгоритм, позволяющий устранять размытие и слабую освещенность на снимках, полученных с помощью камеры мобильного телефона, однако он основан на использовании статистических параметров, что не позволяет эффективно справляться с артефактами движения и может привести к искажению мелких деталей. Также этот подход, хоть и снижает шум в общем, но не учитывает нелинейные шумовые модели мобильных сенсоров, особенно в ситуации с высокой дисперсией пикселей. Кроме того, в статье предложен последовательный подход к обработке кадров, хотя отдельные статистические алгоритмы могут быть распараллелены, но это вызывает высокую нагрузку на мобильные процессоры.

В свою очередь, в статье [2] предложен нейросетевой GAN-ориентированный алгоритм, позволяющий комплексно повышать качество снимка до уровня цифровых зеркальных камер с использованием слабого надзора (на несоответствующих парах данных). Здесь также имеются некоторые недостатки в контексте решаемой задачи. Например, использование GAN может приводить к появлению «фантомных» текстур или артефактов в областях с низкой информативностью (тени или неоднородные поверхности), а также к искажению локальных контрастов или цветовых переходов в сценах с высокой динамикой. GAN-подход часто добавляет лишние детали, интерпретируя шум как структуры, имеющие значения. Кроме того, GAN-архитектуры требуют значительных вычислительных ресурсов для инференса, что неприменимо для мобильных устройств и использования в реальном времени.

Повышению качества снимков высокого разрешения посвящена работа [3], в которой предлагается подход мозаичного смешения снимков, сделанных устройствами различного типа. В контексте решаемой задачи, совмещение изображений с бортовых камер и аэрофотоснимков с различным ракурсом приводит к появлению геометрических артефактов из-за различных углов обзора и разрешений камер, а наличие движущихся объектов создает конфликты данных, фантомные объекты и размытия, которые никак не обрабатываются в предложенном подходе. Кроме того, алгоритм изначально последовательный и не подразумевает распараллеливания на высоком уровне.

Обработка и улучшение снимков любого вида рассматривается авторами в работе [4], в которой предлагается алгоритм повышения разрешения гиперспектрального изображения, основанный на спектральном не смешивании, для слияния многоспектрального изображения с высоким пространственным разрешением и изображения с низким пространственным разрешением. Однако, точность представленного метода сильно зависит от корректности оценки спектральных компонент и их пространственного распределения, нелинейные эффекты непременно приводят к спектральным искажениям и артефактам. Кроме того, алгоритм требует решения задач оптимизации для спектрального размешивания и пространственной реконструкции, что делает его ресурсоемким.

Известны также работы, посвященные вопросам повышения отдельных свойств снимка: разрешение, экспозиция, резкость и размытие и пр. за счет совмещения снимков с имеющимися в базе данных и вычисления на основе полученного совмещения нового изображения [5].

В отличие от методов, направленных на обработку готового снимка, в работе [6] рассматривается метод, позволяющий пользователю за счет интерактивных подсказок по управлению камерой получить более качественный снимок. Однако такой метод может быть применим для системы, где участвует «человек-оператор», но не для систем с автоматизацией процессов.

Проведенный анализ показал, что существующие решения направлены на увеличение разрешения фотоснимка без потери качества и улучшение изображения, представленного на фотоснимке (повышение детализации и улучшение восприятия) за счет применения сложных и последовательных алгоритмов, которые зачастую не применимы на мобильных устройствах или требуют комбинированных архитектур, включающих мощные вычислительные устройства, что нереально для систем с автоматизацией, проблемами со связью и приближением к реальному времени.

В работе [7] предложен подход к получению снимков высокого разрешения с помощью камеры мобильного телефона. Основным отличием предложенного подхода от известных алгоритмов панорамной съемки является использование слоев-масок, получаемых из снимка общего плана измеряемого объекта. Слои-маски позволяют точнее позиционировать телефон, сохраняя не только крайние точки фотографий частей объекта при их склеивании, но также и пропорции объекта, что позволяет избежать известных искажений, присущих панорамным снимкам.

Также автор принимал участие в более детальной проработке метода фотограмметрического измерения геометрических параметров объектов, инвариантного к фоторегистрирующим устройствам [8]. Предложена методика подготовки исходных данных, в которой предлагается способ повышения разрешения изображений для прикладной фотограмметрии, основанный на адаптивной сшивке подкадров с использованием LR-шаблона на основе сетки, подготавливаемой с помощью человека-оператора.

Эти идеи развиты автором в ходе исследований и экспериментов. В частности, предложенный в данной статье метод формирования изображений высокого разрешения и модифицированный алгоритм, его реализующий, отличается от предыдущих следующим: использованием адаптивной сшивкой с LR-шаблоном, распараллеливанием на группе мобильных устройств, а также комбинацией процедур обработки контуров и ключевых точек подкадров, что делает его более подходящим для мобильных решений с жесткими требованиями к точности, качеству и скорости обработки информации.

Постановка задачи. В ходе анализа источников было установлено, что существующие методы обычно обладают двумя существенными ограничениями:

1) **накопление ошибок** при последовательной сшивке кадров – это приводит к дрейфу координат, особенно при работе в динамически изменяющихся условиях окружающей среды;

2) **высокие вычислительные затраты или недоступность распараллеливания:** это выражается в том, что алгоритмы, основанные на глубоком обучении, статистике или глобальной оптимизации, требуют значительных ресурсов памяти и процессорной мощности и, как правило, выполняются на одном мощном устройстве или удаленно в «облаке».

Соответственно, актуальной задачей является разработка метода, лишенного указанных недостатков и допускающего возможность применения в промышленных сценариях.

Математическая модель для реализации метода. Разработанный метод должен устранять указанные проблемы за счет следующих факторов:

- ♦ реализации первичного формирования опорного изображения низкого разрешения (LR), служащего геометрическим каркасом для подкадров изображения высокого разрешения (HR) и морфологией для размещения сшиваемых подкадров в пространстве LR;
- ♦ адаптивного сопоставления ключевых точек между подкадрами и сегментами LR-изображения с применением фильтрации и анализа контуров;
- ♦ перехода от последовательной обработки подкадров к параллельной, позволяющей разделить вычислительную нагрузку между мобильными объектами.

Актуальность предложенного метода подтверждается его применимостью в промышленных сценариях, поэтому далее рассмотрим формальную математическую модель предложенного метода, позволяющую описать структуру метода и последовательность обра-

ботки информации, которая включает в себя формирование опорного LR-изображения, детекцию ключевых точек и дескрипторов, сопоставление HR-кадров, процедуру распараллеливания и распределенной обработки информации.

Формирование опорного LR-изображения. Опорное изображение низкого разрешения I_{LR} формируется путем получения исходного кадра и понижения разрешения или путем усреднения N исходных кадров $\{I_1, I_2, \dots, I_N\}$ как

$$I_{LR}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i(x, y) + \epsilon(x, y),$$

где $\epsilon(x, y) = G(x, y, \sigma) * I_i$ – гауссова фильтрация с ядром $\sigma = 1.5$. Данный подход снижает шум и артефакты движения малой амплитуды (смещение объектов между кадрами), обеспечивая стабильное изображение для последующей обработки. В результате такого подхода формируется стабильная основа – опорное изображение для последующей реализации предложенного метода. В общем случае это матрица I с размерами $H \times W$, где H – это высота изображения, а W – это его ширина, т.е. имеется возможность создавать опорное изображение как матрицу подкадров. Таким образом, для исходной матрицы изображения I и его точек $I(i, j) \exists i, i \in [1, H] \cap \exists j, j \in [1, W]$, существует часть $I_{crop} = I(x_1: x_2, y_1: y_2)$, определяемая верхним левым углом с координатами (x_1, y_1) и нижним правым углом (x_2, y_2) с пределами $1 \leq x_1 \leq x_2 \leq H \cap 1 \leq y_1 \leq y_2 \leq W$, где I_{crop} будет иметь размеры $(x_2 - x_1 + 1) \times (y_2 - y_1 + 1)$. В этом случае задача сопоставления подкадров заключается в виде покрытия целевой области TM , представляемой в виде матрицы

$$TM = \begin{bmatrix} m_{1,1} & \dots & m_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ m_{m,1} & \dots & m_{m,n} \end{bmatrix},$$

где каждая точка или ячейка должна быть заснята мобильным объектом в определенной последовательности [7, 8].

В этом случае, фокус снимающего мобильного объекта или смартфона пользователя направлен на определенный центр подкадра, что является ключевым моментом для формирования последующего итеративного алгоритма обработки подкадров.

Детекция ключевых точек и дескрипторов. Для выделения ключевых точек в I_{LR} в предложенном методе применяется модифицированный алгоритм SIFT [9–11], состоящий из следующих шагов:

а) построение масштабного пространства

$$L(x, y, \sigma_k) = G(x, y, \sigma_k) * I_{LR}, \quad \sigma_k = \sigma_0 * 2^{\frac{k}{S}},$$

где $\sigma_0 = 1.6$, $S = 3$ – это число масштабов на октаву, k – коэффициент, увеличивающий величину σ для размытия.

б) поиск экстремумов в DoG (Difference of Gaussians)

$$DoG(x, y, \sigma_k) = L(x, y, \sigma_{k+1}) - L(x, y, \sigma_k),$$

где, по сути, DoG приближает лапласиан Гаусса (LoG), который используется для детектирования углов и точек интереса, но более эффективен с точки зрения вычислений, что очень важно в предложенном процессе обработки изображений;

в) расчет дескрипторов за счет формирования 128-мерного вектора для кодирования гистограммы градиентов, например, в 4x4 субрегионах (по числу подкадров в матрице LR).

Сопоставление кадров HR. Для каждой ключевой точки, найденной на изображении, нужно запустить алгоритм поиска совпадений. Примером может являться алгоритм лучшего совпадения первого (Nearest Neighbor), который идентифицирует ближайшего соседа по евклидовому расстоянию среди дескрипторов второго изображения [9–13]. То есть проводится расчет дистанции между двумя дескрипторами для первого D_1 и второго D_2 изображений:

$$dist(D_{1i}, D_{2j}) = \sqrt{\sum_k (D_{1ik} - D_{2jk})^2}.$$

Поэтому для каждого подкадра I_{HR}^j выполняется:

а) поиск соответствий, например при помощи минимизации функции ошибки через RANSAC (Random Sample Consensus), т.е. минимизация ошибки репроекции в задаче оценки параметров математической модели, в которой присутствуют выбросы (outliers):

$$H^* = \arg \min_H \sum_i \rho \left(\|p_i - H * q_i^j\|^2 \right),$$

где $H \in R^{3 \times 3}$ – матрица гомографии, а ρ – функция потерь Хубера (Huber Loss), позволяющая оценить потери для каждого предсказанного значения $\hat{y}$ и истинного значения y

$$\text{как } H(y, \hat{y}) = \begin{cases} \frac{1}{2}(y - \hat{y})^2 & \text{если } |y - \hat{y}| \leq \delta \\ \delta * \left(|y - \hat{y}| - \frac{1}{2}\delta \right) & \text{если } |y - \hat{y}| > \delta \end{cases}, \text{ где } \delta - \text{пороговый параметр, кото-}$$

рый определяет границу между квадратичным и линейным режимом, а $|y - \hat{y}|$ – абсолютное значение ошибки (различия) между истинным и предсказанным значением. Также можно отметить, что функция потерь Хубера в первом случае ($\leq \delta$) ведет себя как среднеквадратичная ошибка MSE, что обеспечивает быструю сходимость, так как градиенты для малых ошибок достаточно велики. Во втором случае, когда ошибка велика, функция приходит к линейному режиму, имитируя поведение средней абсолютной ошибки MAE, т.е. влияние больших ошибок (вбросов) ограничивается, повышая робастность этапа в целом;

б) коррекция контуров, при которой оператор Собеля помогает выделить границы объектов для нормализации шивки как:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * I_{HR}^j, \quad G_y = G_x^T.$$

В этом случае смещение подкадра $(\Delta x, \Delta y)$ определяется через максимизацию корреляции контуров. Это корреляционная функция, вычисляемая как скалярное произведение нормализованных карт градиентов.

Глобальная оптимизация процесса. Оптимизация выполняется при помощи вычисления целевой функции, которая объединяет согласованность преобразований и сохранение градиентов следующим образом:

$$E = \alpha \sum_{i,j} \|H_i - H_j\|^2 + \beta \sum_k \|\nabla I_k - \nabla I_{LR}\|^2,$$

где $\alpha = 0.7, \beta = 0.3$ – весовые коэффициенты. Оптимизацию предлагается выполнять методом Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt, LM). Метод LM, как итеративный алгоритм решения задач нелинейной оптимизации и нахождения минимума функции ошибки и гибрид методов оптимизации типа градиентного спуска и Ньютона-Гаусса [10, 13, 14].

Распараллеливание обработки. Так как в предложенном методе предлагается способ обработки информации достаточно большого объема и, по факту, изображений высокого разрешения, охватывающих большую область пространства, то можно логически развивать предложенную концепцию в плане распараллеливания процесса обработки информации. Автором был предложен вариант распараллеливания на группе мобильных устройств, не изменяя основную концепцию обработки информации. В этом случае общая архитектура системы обработки информации становится распределенной и ее можно реализовывать на практике как локально (в рамках группы мобильных объектов), так и в большем масштабе, с применением обработки или хранения информации в «облаке».

Согласно принятой модели изображения I и тому, что было сказано выше, оно проходит ряд трансформаций Tr :

♦ первичное преобразование – получение изображения $\hat{I} = Tr(I)$, где, чаще всего, в частотной области $\hat{I}$ содержатся коэффициенты, которые можно квантовать и кодировать;

- ♦ квантование – уменьшение количества информации за счет удаления малозначимых коэффициентов через оператор квантования Q , т.е. $\hat{I}_Q = Q(I)$;
- ♦ кодирование (обычно энтропийное типа Хаффмана или арифметического) – сегрегация коэффициентов на важные или малозначимые при помощи перемножения матриц, то есть $\hat{I}_C = C(\hat{I}_Q)$;
- ♦ передача по каналу связи с определенной пропускной способностью B бит/с и уровнем шума и других помех, которые могут нарушить трансляцию или запросить повторную передачу, т.е. $\hat{I}'_C = \hat{I}_C + \epsilon$, где ϵ – это уровень помех и искажений. В реальностях цифровой связи пока можем оставить на уровне нуля;
- ♦ декодирование и восстановление – как обратный процесс, только проводимый лидером столько раз, сколько членов группы участвует в процессе съемки. Кратко этот процесс в модели можно описать как последовательность трансформаций: $\hat{I}'_Q = C^{-1}(\hat{I}'_C)$, $\hat{I}' = Q^{-1}(\hat{I}'_Q)$, и $I' = T^{-1}(\hat{I}')$.

В рамках предложенного варианта решения поставленной задачи происходят следующие процессы:

1. Инициализация процедуры выбора группы мобильных объектов на основании таких критериев как: характеристики камеры, расстояние до точки съемки, энергетический ресурс, вычислительные возможности.
2. Размещение лидирующего МО относительно точки съемки.
3. Размещение участников группы МО относительно лидирующего МО.
4. Формирование опорного изображения LR для передачи участникам группы.
5. Распределение информации, вычислительных и полетных заданий.
6. Выполнение процессов обработки информации на участниках группы МО.
7. Обратный обмен информацией и совмещение подкадров LR и HR на основании ключевых точек, дескрипторов, а также на основе анализа контуров [9, 10, 14–26].

Таким образом метод поддерживает распараллеливание на M устройствах следующим образом:

- а) устройство D_0 генерирует I_{LR} и распределяет зоны и характеристики съемки;
- б) устройства синхронизируются за какое-то конечное время;
- в) каждое устройство D_i обрабатывает свой собственный подкадр I_{HR}^i , применяя локальную коррекцию яркости как

$$I_{adj}^i = a_i * I_{HR}^i + b_i, \quad a_i = \frac{\mu_{LR}}{\mu_i}, \quad b_i = \mu_{LR} - a_i \mu_i.$$

- г) центральный вычислительный узел решает СЛАУ типа $J^T J \Delta H = -J^T r$ для финальной сборки, показанную выше.

Экспериментальные результаты. В общем случае, в ходе работы и экспериментальных исследований сформировался алгоритм, состоящий из следующих этапов:

1. Загрузка параметров алгоритма и начальных изображений. Используется матричное представление изображений в виде 9 на 9 сегментов панорамы для отладки или реальное изображение панорамы с мобильного устройства.
2. Подготовка изображения низкого разрешения или получение такового от ведущего мобильного объекта (опорного изображения). Для отладки используется ресайзинг или понижение разрешения математическими методами. В реальной ситуации используется изображение низкого разрешения, снятое мобильным агентом с большего расстояния чем изображения с агентов, формирующих составные изображения.
3. Получение результата съемки частей изображений от ведомых мобильных объектов как матрица изображений в памяти.
4. Выделение ключевых точек опорного изображения с использованием методов типа SIFT.
5. Выделение ключевых точек составных изображений теми же алгоритмами.
6. Для каждого составного изображения:
 - а. Совмещение точек составного изображения и опорного.

- б. Компенсация смещений и определение истинных координат.
 - с. Размещение кадра на результирующей матрице (изначально пустой).
7. Формирование конечной матрицы и вывод результата.
Структурная схема модифицированного алгоритма приведена на рис. 1.

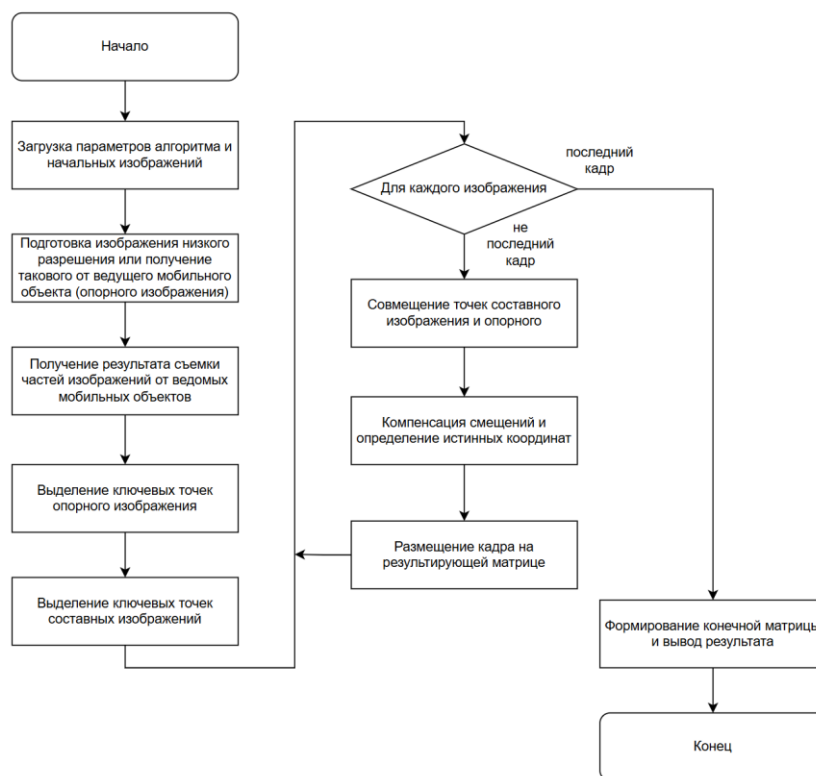


Рис. 1. Структурная схема модифицированного алгоритма обработки информации при формировании изображения высокого разрешения

Далее было разработано программное обеспечение и проведено экспериментальное исследование. В качестве исходного изображения были использованы фото на местности, снятые с мобильного устройства и с дрона с камерой (рис. 2).



Рис. 2. Исходное изображение низкого разрешения

Матрица составных изображений, распределенных на устройства, имела следующий вид (рис. 3).



Рис. 3. Матрица составных изображений, распределенных на устройства

Тогда «карта» распределения ключевых точек и дескрипторов для сшивки представлялась следующим образом (рис. 4).



Рис. 4. «Карта» распределения ключевых точек и дескрипторов для сшивки

Соответственно, в результате эксперимента, совмещенное изображение высокого разрешения, составленное по маске *LR* имело следующий вид (рис. 5).

В целом, тестирование проводилось на наборе более чем из 500 подобных изображений с разрешением 4К, полученных с дронов DJI Phantom 4 (камера 20 Мп) и смартфона типа Xiaomi Mi 11 (камера 108 Мп). В качестве координирующего звена и «источника» первичных параметров использовался микрокомпьютер Raspberry Pi 4 (4 ГБ ОЗУ).

Результаты экспериментов сведены в табл. 1.



Рис. 5. Совмещенное изображение высокого разрешения

Таблица 1

Результаты экспериментов

Параметр	Предложенный метод	Градиентное сглаживание	Нейросетевой подход
SSIM (Structural Similarity Index)	0.92	0.73	0.88
PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)	32.5	28.1	30.9
Время обработки (с/кадр)	0.8	1.5	2.3
Потребление памяти (МБ)	50	85	320

По результатам экспериментов предложенный метод позволил повысить точность (с $SSIM > 0.9$) за счет устранения артефактов на стыках подкадров, использования RANSAC и контурного анализа, производительность за счет использования нескольких устройств при распараллеливании обработки подкадров, энергоэффективность за счет снижения потребляемой памяти по сравнению с нейросетевыми подходами. Кроме того, поддержка распределенных архитектур для обработки в реальном времени является ключом к масштабированию систем, реализующих метод на практике.

Заключение. Таким образом, в работе предложены метод и модифицированный алгоритм обработки информации при формировании изображений высокого разрешения для решения задач прикладной фотограмметрии, основанные на адаптивной сшивке подкадров, полученных в группе МО на основе ключевых точек и анализа контуров с использованием опорного изображения низкого разрешения. Также предложено и апробировано расширение метода за счет распределения задач обработки информации на множество мобильных объектов с обратным восстановлением -изображения за счет совмещения по ключевым точкам и сопоставления контуров.

Экспериментальные результаты демонстрируют повышение точности сшивки на 25% ($SSIM = 0.92$) и снижение времени обработки на 40% по сравнению с традиционными методами. Метод адаптирован для устройств с ограниченными вычислительными ресурсами, включая распределенные системы на базе мобильных платформ, а также допускает оптимизацию на основе распараллеливания в группе мобильных устройств.

Таким образом, предложенные метод и алгоритм сочетают высокую точность, низкие вычислительные затраты и возможность масштабирования. Предложенное решение имеет практическую значимость и предполагает внедрение в промышленности, сельском хозяйстве, использование в системах мониторинга и робототехники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ratna Babu K. and Dr. K. V. N. Sunitha. A New Approach to Enhance Images of Mobile Phones with In-Built Digital Cameras Using Mean And Variance // International Conference on Advances In Computer Engineering. – 2013.
2. Ignatov A., Kobyshev N., Timofte R., Vanhoey K., & Van Gool L. WESPE: Weakly supervised photo enhancer for digital cameras // In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – 2018. – <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2018.00112>.

3. Masafumi Noda, Tomokazu Takahashi, Daisuke Deguchi, Ichiro Idei, Hiroshi Murase, Yoshiko Kojima and Takashi Naito. Road Image Update using InVehicle Camera Images and Aerial Image // IEEE Intelligent Vehicles Symposium (Iv) Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011.
4. Mohamed Amine Bendoumi, Mingyi He, Shaohui Mei. Hyper Spectral Image Resolution Enhancement Using High-Resolution Multispectral ImageBased on Spectral Unmixing // IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing. – 2011.
5. Zhang C., Gao J., Wang O., Georgel P., Yang R., Davis J., Pollefeys M. Personal photograph enhancement using internet photo collections // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2014. – 20 (2). – P. 262-275.
6. Xu Y., Ratcliff J., Scovell J., Speiginer G., & Azuma R. Real-time guidance camera interface to enhance photo aesthetic quality // In Conference on Human Factors in Computing Systems: Proceedings. – 2015. – Vol. 2015-April. – P. 1183-1186. Association for Computing Machinery. – <https://doi.org/10.1145/2702123.2702418>.
7. Самойлов А.Н., Кучерова М.С., Сергеев Н.Е. Подход к получению цифровых изображений высокого разрешения с помощью камеры мобильного устройства // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. научных работ IX Всероссийской научной конференции, Нижний Архыз, 24–27 сентября 2019 года. – Нижний Архыз, 2019. – С. 346-351.
8. Самойлов А.Н., Сергеев Н.Е., Волошин А.В., Козловский А.В. Метод фотограмметрического измерения геометрических параметров объектов, инвариантный к фоторегистрирующим устройствам // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. – 2021. – № 4 (291). – С. 58-69. – DOI: 10.53598/2410-3225-2021-4-291-58-69.
9. Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 60. – P. 91-100.
10. Brown M., Lowe D.G. Multi-Image Matching using Multi-Scale Oriented Patches // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – Vol. 1. – P. 510-517.
11. Мельник Э.В., Самойлов А.Н., Козловский А.В., Волощук В.И. Применение мобильных устройств при решении задач прикладной фотограмметрии // Перспективные системы и задачи управления: Матер. XIX Всероссийской научно-практической конференции и XV молодежной школы-семинара. Таганрог, 01 апреля 2024 г. – Таганрог: ДиректСайнс (ИП Шкуркин Д.В.), 2024. – С. 459-462.
12. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Communications of the ACM. – 1981. – P. 726-740.
13. Zhou F. [et al.] Edge-Preserving Image Processing for Mobile Devices // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2018.
14. Szeliski R. Image Alignment and Stitching: A Tutorial // Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. – 2007. – Vol. 2, No. 1. – P. 1-104.
15. Самойлов А.Н., Волошин А.В., Козловский А.В. Алгоритмическое обеспечение системы интеллектуальной обработки цифровых изображений для задач прикладной фотограмметрии // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2019. – № 3 (246).
16. Беспалов Д.А., Поленов М.Ю., Иванов Д.А. Реализация геоинформационной системы на основе распределенной архитектуры обработки данных // Информатизация и связь. – 2021. – № 8. – С. 60-65.
17. Bepalov D., Polenov M., Ivanov D. Using a Distributed Architecture of a Geographic Information System to Support Thin Clients // Proceedings of 6th Computational Methods in Systems and software. – 2023. – Vol. 1. – P. 663-669.
18. Мельник Э.В., Сафроненкова И.Б. Предметно-ориентированная онтологическая модель распределенной системы мониторинга с мобильными компонентами на базе распределенного реестра // XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023): Матер. мультikonференции. В 4-х т. Т. 2. Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 305-308.
19. Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 605.
20. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Hybrid Algorithm of Mobile Position-Trajectory Control // Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of the 8th Computer Science On-line Conference, Springer, Czech Republic, 2019. – Vol. 2. – P. 287-295.
21. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Гибридный алгоритм управления роем гомогенных роботов в условиях ограниченного пространства // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (78). – С. 72-82.
22. Клименко А.Б., Мельник Я.Э. Исследование возможности применения концепции туманных вычислений и технологии распределенного реестра при построении информационно-управляющих систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 19-27.

23. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Научно-практический журнал Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 7-11.
24. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление роем роботов при исследовании некоторой территории методом силовой релаксации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 5 (207).
25. Капустян С.Г., Мельник Э.В. Системный анализ требований и оптимизация состава группы роботов в задаче мониторинга окружающей среды // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 12-25. – DOI: 10.14529/mmph240202.
26. Таранов А.Ю., Мельник Э.В., Косьянчук В.В., Платошин Г.А. Коммуникация в реконфигурируемых информационно-управляющих системах критического назначения и перспективный способ ее обеспечения // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2024. – № 4 (149). – С. 140-154.

REFERENCES

1. Ratna Babu K. and Dr.K.V.N. Sunitha. A New Approach to Enhance Images of Mobile Phones with In-Built Digital Cameras Using Mean And Variance, *International Conference on Advances In Computer Engineering*, 2013.
2. Ignatov A., Kobyshev N., Timofte R., Vanhoey K., & Van Gool L. WESPE: Weakly supervised photo enhancer for digital cameras, *In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2018.00112>.
3. Masafumi Noda, Tomokazu Takahashi, Daisuke Deguchi, Ichiro Idei, Hiroshi Murase, Yoshiko Kojima and Takashi Naito. Road Image Update using InVehicle Camera Images and Aerial Image, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (Iv) Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011*.
4. Mohamed Amine Bendoumi, Mingyi He, Shaohui Mei. Hyper Spectral Image Resolution Enhancement Using High-Resolution Multispectral ImageBased on Spectral Unmixing, *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, 2011.
5. Zhang C., Gao J., Wang O., Georgel P., Yang R., Davis J., Pollefeys M. Personal photograph enhancement using internet photo collections, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2014, 20 (2), pp. 262-275.
6. Xu Y., Ratcliff J., Scovell J., Speiginer G., & Azuma R. Real-time guidance camera interface to enhance photo aesthetic quality, *In Conference on Human Factors in Computing Systems: Proceedings*, 2015, Vol. 2015-April, pp. 1183-1186. Association for Computing Machinery. Available at: <https://doi.org/10.1145/2702123.2702418>.
7. Samoylov A.N., Kucherova M.S., Sergeev N.E. Podkhod k polucheniyu tsifrovyykh izobrazheniy vysokogo razresheniya s pomoshch'yu kamery mobil'nogo ustroystva [An approach to obtaining high-resolution digital images using a mobile device camera], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. nauchnykh rabot IX Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii, Nizhniy Arkhyz, 24–27 sentyabrya 2019 goda* [System synthesis and applied synergetics: Collection of scientific papers of the IX All-Russian Scientific Conference, Nizhny Arkhyz, September 24-27, 2019]. Nizhniy Arkhyz, 2019, pp. 346-351.
8. Samoylov A.N., Sergeev N.E., Voloshin A.V., Kozlovskiy A.V. Metod fotogrammetricheskogo izmereniya geometricheskikh parametrov ob"ektov, invariantnyy k fotoregistriruyushchim ustroystvam [A method for photogrammetric measurement of geometric parameters of objects invariant to photo-registering devices], *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adyghe State University. Series: Natural-mathematical and technical sciences], 2021, No. 4 (291), pp. 58-69. DOI: 10.53598/2410-3225-2021-4-291-58-69.
9. Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 2004, Vol. 60, pp. 91-100.
10. Brown M., Lowe D.G. Multi-Image Matching using Multi-Scale Oriented Patches, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, Vol. 1, pp. 510-517.
11. Mel'nik E.V., Samoylov A.N., Kozlovskiy A.V., Voloshchuk V.I. Primenenie mobil'nykh ustroystv pri reshenii zadach prikladnoy fotogrammetrii [The use of mobile devices in solving applied photogrammetry problems], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XIX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XV molodezhnoy shkoly-seminara. Taganrog, 01 aprelya 2024 g* [Prospective systems and control tasks: Materials of the XIX All-Russian scientific-practical conference and XV youth school-seminar. Taganrog, April 1, 2024]. Taganrog: DirektSayns (IP Shkurkin D.V.), 2024, pp. 459-462.
12. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, 1981, pp. 726-740.
13. Zhou F. [et al.] Edge-Preserving Image Processing for Mobile Devices, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018.
14. Szeliski R. Image Alignment and Stitching: A Tutorial, *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 2007, Vol. 2, No. 1, pp. 1-104.

15. Samoylov A.N., Voloshin A.V., Kozlovskiy A.V. Algoritmicheskoe obespechenie sistemy intellektual'noy obrabotki tsifrovyykh izobrazheniy dlya zadach prikladnoy fotogrammetrii [Algorithmic support of the system for intelligent processing of digital images for applied photogrammetry tasks], *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adyghe State University. Series 4: Natural-mathematical and technical sciences], 2019, No. 3 (246).
16. Bepalov D.A., Polenov M.YU., Ivanov D.A. Realizatsiya geoinformatsionno sistemy na osnove raspredelenno arkhitektury obrabotki dannykh [Implementation of a geographic information system based on a distributed data processing architecture], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2021, No. 8, pp. 60-65.
17. Bepalov D., Polenov M., Ivanov D. Using a Distributed Architecture of a Geographic Information System to Support Thin Clients, *Proceedings of 6th Computational Methods in Systems and software*, 2023, Vol. 1, pp. 663-669.
18. Mel'nik E.V., Safronenkova I.B. Predmetno-orientirovannaya ontologicheskaya model' raspredelennoy sistemy monitoringa s mobil'nymi komponentami na baze raspredelenno reestra [Domain-oriented ontological model of a distributed monitoring system with mobile components based on a distributed registry], *XVI Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya (MKPU-2023): Mater. mul'tikonferentsii* [XVI All-Russian Multiconference on Control Problems (MKPU-2023): Conference materials]. In 4ur t. Vol. 2. Volgograd, 11–15 September 2023. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2023 33. 305-308.
19. Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Gayduk A.R. Samoorganizuyushchiesya raspredelennye sistemy upravleniya gruppami intellektual'nykh robotov, postroennye na osnove setevoy modeli [Self-organizing distributed control systems for groups of intelligent robots based on a network model], *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sb. trudov* [Control of large systems: collection of works], 2020, Vol. 30, No. 1, pp. 605.
20. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Hybrid Algorithm of Mobile Position-Trajectory Control, *Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of the 8th Computer Science Online Conference*, Springer, Czech Republic, 2019, Vol. 2, pp. 287-295.
21. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Gibridnyy algoritm upravleniya roem gomogenykh robotov v usloviyakh ogranichennogo prostranstva [Hybrid algorithm for controlling a swarm of homogeneous robots in a limited space], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Transport], 2020, No. 2 (78), pp. 72-82.
22. Klimenko A.B., Mel'nik Ya.E. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya kontseptsii tumannykh vychisleniy i tekhnologii raspredelenno reestra pri postroenii informatsionno-upravlyayushchikh sistem [Study of the possibility of applying the concept of fog computing and distributed ledger technology in the construction of information and control systems], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Tula State University. Technical Sciences], 2021, No. 2, pp. 19-27.
23. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Upravlenie dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov v kolonne [Control of the movement of a group of mobile robots in a column], *Nauchno-prakticheskiiy zhurnal Informatizatsiya i svyaz'* [Scientific and practical journal Informatization and Communication], 2021, No. 3, pp. 7-11.
24. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Upravlenie roem robotov pri issledovanii nekotoryy territorii metodom silovoy relaksatsii [Control of a robot swarm in the study of certain territories by the method of force relaxation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 5 (207).
25. Kapustyan S.G., Mel'nik E.V. Sistemnyy analiz trebovaniy i optimizatsiya sostava gruppy robotov v zadache monitoringa okruzhayushchey sredy [System analysis of requirements and optimization of the composition of a robot group in the task of environmental monitoring], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics], 2024, Vol. 16, No. 2, pp. 12-25. DOI: 10.14529/mmph240202.
26. Taranov A.Yu., Mel'nik E.V., Kos'yanchuk V.V., Platoshin G.A. Kommunikatsiya v rekonfiguriruemyykh informatsionno-upravlyayushchikh sistemakh kriticheskogo naznacheniya i perspektivnyy sposob ee obespecheniya [Communication in reconfigurable critical information and control systems and a promising method for its provision], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya Priborostroenie* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering], 2024, No. 4 (149), pp. 140-154.

Козловский Александр Вячеславович – Южный федеральный университет; e-mail: kozlovskiy@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79888980779; кафедра вычислительной техники; старший преподаватель.

Kozlovskiy Alexander Vyacheslavovich – Southern Federal University; e-mail: kozlovskiy@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79888980779; the Department of Computer Engineering; senior lecturer.

Раздел II. Анализ данных и моделирование

УДК 621.315.611

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-104-118

Н.К. Полуянович, О.В. Качелаев, М.Н. Дубяго

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ И ОЦЕНКА ЕЕ РОБАСТНОСТИ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С АДДИТИВНЫМИ ПРОФИЛЯМИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Рассматривается построение робастной модели, оценка ее точности в задачах прогнозирования электрической нагрузки с аддитивными профилями потребления. Проведено исследование влияния параметров нейросети (размер пакета данных; количество слоев нейросети; функции активации нейронов; оптимизаторы) на погрешность прогнозирования электропотребления. Приведены графики сравнения профилей фактического и прогнозного потребления и отклонения прогноза для потребления электроэнергии выше среднего значения за рассматриваемый период. Подобраны оптимальные параметры прогностической нейросетевой модели в ручном режиме. Результат исследования разновидностей генетических алгоритмов выявил оптимальный гибридный алгоритм обучения нейросетевой модели основанный на быстрой сходимости решения. Проведено тестирование созданного на языке "Python" алгоритма подбора гиперпараметров сети на данных об электропотреблении с различными характерами потребления электроэнергии. Проведенное обучение и тестирование генетического алгоритма подтвердило возможность получения прогнозов большей точности и возможность автоматизации подбора оптимальных гиперпараметров. В задачах прогнозирования электропотребления с использованием нейросетевой модели, независимо от способа создания структуры, подобрана оптимальная метрика. Выявлено, что для потребителей с аддитивными профилями потребления электроэнергии целесообразно использовать робастную функцию потерь Хьюбера, в то же время, для потребителей с циклическим или имеющим закономерности профиле потребления электроэнергии применение скользящего окна увеличивает ошибку, в отличии от аддитивных потребителей. Показано, что применение генетического алгоритма значительно увеличивает точность прогнозирования благодаря индивидуальному подбору оптимальных параметров для конкретного потребителя. Разработана структурная схема интеллектуального устройства прогнозирования режимов энергопотребления. Введена система помощи принятия решений, позволяющая реализовать планово-упреждающее управление, основываясь на данных, снимаемых со счетчика электроэнергии и полученных в результате работы нейросетевой модели прогнозирования. Система помощи принятия решений производит расчет отклонения прогнозных величин потребленной мощности от фактических и как результат – выдает рекомендации диспетчеру распределительных энергосетей. На основании данных от системы помощи принятия решений оператор распределительных энергосетей может принимать решение о заказе необходимого объема электроэнергии, получает возможность контролировать возможные всплески и снижения потребления электроэнергии у потребителя, ненормированную работу оборудования, а также дополнительно контролировать адекватность работы нейросетевой модели.

Генетическая нейронная сеть; робастная модель; гибридный алгоритм; аддитивный характер потребителей; прогнозирование электропотребления; упреждающее управление; распределительные сети.

N.K. Poluyanovich, O.V. Kachelaev, M.N. Dubyago

BUILDING A MODEL AND EVALUATING ITS ROBUSTNESS IN THE TASK FORECASTING FOR CONSUMERS WITH ADDITIVE TECHNOLOGIES ELECTRICITY CONSUMPTION PROFILES

The construction of a robust model and an assessment of its accuracy in problems of forecasting electrical loads with additive consumption profiles are considered. A study was conducted on the influence of neural network parameters (data packet size; number of neural network layers; neuron activation func-

tions; optimizers) on the error in predicting power consumption. Graphs comparing the profiles of actual and projected consumption and the deviation of the forecast for electricity consumption above the average value for the period under review are presented. Optimal parameters of the predictive neural network model have been selected in manual mode. The result of the study of the varieties of genetic algorithms revealed the optimal hybrid algorithm for learning a neural network model based on the rapid convergence of the solution. A Python-based algorithm for selecting network hyperparameters based on power consumption data with different patterns of electricity consumption has been tested. The conducted training and testing of the genetic algorithm confirmed the possibility of obtaining forecasts of greater accuracy and the possibility of automating the selection of optimal hyperparameters. In the tasks of forecasting power consumption using a neural network model, regardless of the method of creating the structure, the optimal metric has been selected. It is revealed that for consumers with additive profiles of electricity consumption, it is advisable to use the robust Huber loss function, at the same time, for consumers with a unique or regular profile of electricity consumption, the use of a sliding window increases the error, unlike additive consumers. It is shown that the use of a genetic algorithm significantly increases the accuracy of forecasting due to the individual selection of optimal parameters for a specific consumer. A block diagram of an intelligent device for predicting energy consumption modes has been developed. A decision-making assistance system has been introduced that allows for the implementation of planned proactive management based on data taken from the electricity meter and obtained as a result of the neural network forecasting model. The decision-making assistance system calculates the deviation of the projected power consumption values from the actual ones and, as a result, issues recommendations to the dispatcher of the distribution power grids. Based on data from the decision-making assistance system, the distribution grid operator can make a decision on ordering the required amount of electricity, gets the opportunity to monitor possible spikes and decreases in consumer electricity consumption, abnormal equipment operation, and additionally monitor the adequacy of the neural network model.

Genetic neural network; robust model; hybrid algorithm; additive nature of consumers; forecasting of power consumption; proactive management; distribution networks.

Введение. Актуальность стратегических приоритетов и цели государственной политики в сфере реализации комплексной государственной программы Российской Федерации для современных предприятий были обозначены в постановлении Правительства РФ от 9 сентября 2023 г. N 1473 "Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности" [1–3]. Учитывая значительный физический износ оборудования, высокие показатели удельных расходов топлива и потерь в сетях проводится модернизация предприятий, генерирующих электрическую энергию, устанавливаются приборы учета. Согласно Указа Правительства РФ ставится задача глобального уровня, направленная на снижение энергоёмкости на 40% относительно показателей за две тысячи седьмой год. Мероприятия, нацеленные на увеличение энергоэффективности, увеличение прибыли, за счет снижения убытков предприятий, выполняющих задачи в отрасли электроэнергетики, начинают производиться в настоящее время. Важнейшей задачей становится прогнозирования потребленных объемов электроэнергии, в разрезе мероприятий, направленных на оптимизацию электроэнергетических затрат предприятия. Проблема прогнозирования электропотребления заключается в том, что необходимо учесть огромное количество факторов, имеющих влияние на изменение энергопотребления [4, 5]. По оценкам российских специалистов, каждая оплошность в ежегодном прогнозе электропотребления на 1% – это 4 млрд. долларов дополнительных инвестиций на возведение генерирующих мощностей [6]. Целью прогнозирования электропотребления является обеспечение баланса между выработанной и потребленной электроэнергией [7].

Постановка задачи. Разработка оптимальной структуры системы прогнозирования для потребителей с атипичным характером электропотребления т.е. не повторяющимся значением профилей потребляемой (P , Q) за рассматриваемые периоды времени, а также математической модели прогнозируемого объема электропотребления, включающей в себя кроме целевых параметров электросети (P , Q) учет воздействующих факторов: социально-экономических; технологических и метеорологических.

Обзор литературных источников. Методы прогнозирования электропотребления на основе регрессионного анализа описаны в работах Манусова В.З. и Никифорова Г.В., применительно к краткосрочному прогнозированию объемов потребления электроэнер-

гии. Прогнозированием пробоя в электроизоляции на основе ИНС было предложено Поляковым Д.А. Прогнозированию электропотребления посвящены работы Воронова И.В. и Демура, А.В. Применение метода экспоненциального сглаживания в задачах прогнозирования было предложено Клеопатровым Д.И. Лагуткин, О.Е. предложил метод на основе технотензора. Влияние точности прогнозов потребления на технологические и экономические показатели энергосистемы рассмотрено в работе [8]. Для обеспечения минимального расхода электроэнергии, предотвращения перегрузок на электрооборудовании и в электросетях, а также улучшения качества электроэнергии энергосистемам необходимо повышать точность прогноза [9].

Однако, в случае с потребителями с атипичным характером потребления электроэнергии, предложенные методы не могут быть полноценно применены. Причиной являются такие ограничения как: большой период времени, за который собираются статистические выборки и отсутствие возможности применения большого количества влияющих факторов.

Задачам создания интеллектуальных устройств прогнозирования энергопотребления посвящено много работ. Так в [10] указывается возможность использования нейронной сети прямой связи для прогнозирования электропотребления. Однако данный метод не позволяет: учитывать реактивную мощность, учитывать данные о метеорологических параметрах; нет механизма адаптации. Для прогнозирования кратко- и среднесрочных объемов потребления электроэнергии может применяться «Устройство прогнозирования электропотребления на основе многослойной нейронной сети» [11]. Данное устройство может обеспечить формирование значений на основе разности фактических и аппроксимированных значений потребленной электроэнергии. Данный факт положительно сказывается на точности прогнозирования, путем сужения интервала необходимой нормализации данных. Однако недостатком данного устройства являются отсутствие механизма адаптации. «Устройство мониторинга и прогнозирования электропотребления в электроэнергетических системах на основе нейронных структур» [12], не учитывает данные о внешних воздействующих факторах, таких как: скорость ветра; наличие осадков; отсутствие блока адаптации под конкретного потребителя (учет характера кривой потребления электроэнергии) и подстройки устройства в зависимости от получаемой точности прогнозирования. Таким образом встает задача разработки интеллектуального устройства адаптивного прогнозирования режимов энергопотребления электросети.

Алгоритм обучения НС. Классическим алгоритмом обучения нейронной сети [13] считается алгоритм обратного распространения ошибки. Процесс обучения нейронной сети итерационный – предполагается, что обучение происходит в течение некоторого количества эпох, при этом в рамках одной эпохи нейронной сети предъявляются все объекты обучающей выборки [14]. Для каждого нейрона j на слое n ($n > 1$) его выходное значение $o_j^{(n)}$ определяется в соответствии с выражением

$$o_j^{(n)} = \varphi(s_j^{(n)}). \quad (1)$$

Тогда выходные значения нейронной сети будут вычисляться как

$$y_k = \varphi(s_j^{(N)}). \quad (2)$$

Таким образом, значения на выходном слое сети зависят от всех весовых коэффициентов. Изначально все весовые коэффициенты сети инициализируются достаточно малыми случайными числами. Согласно [15] существует три варианта корректировки весовых коэффициентов нейронной сети в рамках одной эпохи. Первый из них предполагает корректировку после предъявления каждого объекта из обучающей выборки; второй предполагает разделение обучающей выборки на части (обычно равные) и корректировку весов после предъявления каждой такой части; в третьем варианте корректировка весов выполняется после предъявления всех объектов обучающей выборки. В данной работе рассматривается первый вариант, в связи с чем суммарная функция потерь E может быть представлена как сумма значений функций потерь $f(t_j, y_j)$ на каждом выходе нейронной сети. Поэтому обучение сети сводится к решению следующей задачи оптимизации:

$$E = \sum_{j=1}^{l(N)} f(t_j, y_j) \rightarrow \min_{\omega_{ij}^{(1)}, \dots, \omega_{ij}^{(N-1)}}, \quad (3)$$

где t_j – требуемый ответ на j -м выходе сети – определяется следующим образом

$$t_j = \begin{cases} 1, & X_m \in q_j \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

Как правило, в качестве функции потерь используется квадратичная функция:

$$f(t_j, y_j) = \frac{1}{2} (y_j - t_j)^2. \quad (4)$$

Будем называть нейронные сети, построенные с использованием квадратичной функции потерь, классическими. Для минимизации суммарной функции потерь необходимо вычислить её производную по весам нейронной сети. Исходя из (1) и (2), частная производная (3) вычисляется по следующему цепному правилу [15]:

$$E'_{ji}{}^{(n)} = \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}^{(n-1)}} = \frac{\partial E}{\partial o_j^{(n)}} \frac{\partial o_j^{(n)}}{\partial s_j^{(n)}} \frac{\partial s_j^{(n)}}{\partial \omega_{ij}^{(n-1)}}. \quad (5)$$

Во входном значении нейрона $s_j^{(n)}$ от $\omega_{ij}^{(n-1)}$ зависит только одно слагаемое, таким образом

$$\frac{\partial s_j^{(n)}}{\partial \omega_{ij}^{(n-1)}} = \frac{\partial}{\partial \omega_{ij}^{(n-1)}} \left(\sum_{i=1}^{l(n-1)} \omega_{ij}^{(n-1)} o_i^{(n-1)} \right). \quad (6)$$

Производная выходного значения нейрона $o_j^{(n)}$ по его входному значению $s_j^{(n)}$ – это производная функции активации:

$$\frac{\partial o_j^{(n)}}{\partial s_j^{(n)}} = \frac{d\varphi(s_j^{(n)})}{ds_j^{(n)}}. \quad (7)$$

Если нейрон находится на выходном слое, то $n = N$ и первый множитель в (5) можно легко вычислить, поскольку $o_j^{(N)} = y_j$:

$$\frac{\partial E}{\partial o_j^{(N)}} = \frac{\partial E}{\partial y_j} = \frac{\partial f(y_j, t_j)}{\partial y_j}. \quad (8)$$

Теперь получим выражение для производной E по $o_j^{(n)}$ в случае, когда n – произвольный внутренний слой сети. Для этого рассмотрим E как функцию от входных значений нейронов следующего слоя:

$$E = E(s_k^{(n+1)}), k = 1, \dots, l^{(n+1)},$$

а затем возьмем производную по $o_j^{(n)}$ [15]:

$$\frac{\partial E}{\partial o_j^{(n)}} = \sum_{k=1}^{l(n+1)} \left(\frac{\partial E}{\partial s_k^{(n+1)}} \frac{\partial s_k^{(n+1)}}{\partial o_j^{(n)}} \right) = \sum_{k=1}^{l(n+1)} \left(\frac{\partial E}{\partial s_k^{(n+1)}} \frac{\partial s_k^{(n+1)}}{\partial o_j^{(n)}} \right) w_{jk}^{(n)}. \quad (9)$$

Производную (9) можно вычислить, если известны все производные по выходным значениям для следующего слоя. Таким образом, производная суммарной функции потерь будет вычисляться в соответствии с

$$E'_{ji}{}^{(n)} = \delta_j^{(n)} o_i^{(n-1)}, \quad (10)$$

где $\delta_j^{(n)}$, исходя из (5-9), вычисляется следующим образом:

$$\delta_j^{(n)} = \frac{\partial E}{\partial o_j^{(n)}} \frac{\partial o_j^{(n)}}{\partial s_j^{(n)}} = \begin{cases} \frac{\partial f(y_j, t_j)}{\partial y_j} \varphi'(y_j), & n = N, \\ \left(\sum_{k=1}^{l(n+1)} w_{jk}^{(n)} \delta_k^{(n+1)} \right) \varphi'(s_j^{(n)}), & \text{иначе.} \end{cases} \quad (11)$$

Поскольку соотношение для вычисления производной известно, для решения задачи оптимизации можно воспользоваться методом градиентного спуска [15]. В этом случае корректировка весов $w_{ij}^{(n-1)(p)}$ на итерации p имеет вид:

$$\omega_{ij}^{(n-1)p} = \omega_{ij}^{(n-1)(p-1)} + \Delta \omega_{ij}^{(n-1)p}. \quad (12)$$

В данном соотношении $\Delta \omega_{ij}^{(n-1)(p)}$ вычисляется как

$$\Delta \omega_{ij}^{(n-1)p} = -\eta E'_{ji}^{(n)(p)} = -\eta \delta_j^{(n)(p)} o_i^{(n-1)(p)}, \quad (13)$$

где $\eta > 0$ – скорость обучения сети, $E'_{ji}^{(n)(p)}$ – производная суммарной функции потерь на итерации p , а $\delta_j^{(n)(p)}$ на итерации p вычисляется в соответствии с соотношением (11), в котором вместо весов $w_{jk}^{(n)}$ используются веса $w_{jk}^{(n-1)(p)}$.

При реализации алгоритма обратного распространения ошибки в качестве функции активации $\varphi = \varphi(z)$ часто используют одну из функций, описанных в [20].

Следует отметить, однако, что последняя из перечисленных функций (ReLU) чаще используется в более сложных нейронных сетях (при глубоком обучении). К тому же она обладает существенным недостатком: нулевая производная на части области определения может привести к тому, что корректировка весов не будет оказывать никакого эффекта и модель перестанет обучаться [16]. Как правило, в нейронных сетях с простой архитектурой отдают предпочтение сигмоидальной функции активации или гиперболическому тангенсу.

Интеллектуальное устройство предупреждающего прогнозирования режимов энергопотребления и помощи в принятии решений. Встает задача создания приборов непрерывного мониторинга и прогнозирования энергопотребления, с учетом факторов времени, метеорологических условий, отключений отдельных питающих линий электропередач, режима работы потребителей электроэнергии в реальном времени. Преимуществом предлагаемой модели (рис. 1) является непрерывный мониторинг и прогнозирование энергопотребления в реальном режиме времени с применением системы помощи принятия решений, передающей информацию ($P_{\text{прог}}$, $Q_{\text{прог}}$, ϵ) для оценки потребления и формирования заявки на закупку электроэнергии в диспетчерское управление распределительными энергосетями (ДУ РЭС), автоматизированный подбор гиперпараметров НС-модели при помощи генетического алгоритма (ГА).

Оценка точности прогнозирования, осуществляется по формуле (14):

$$E = \frac{|\sum P_{\text{прог}} - \sum P_{\text{потр}}|}{\sum P_{\text{потр}}} * 100, \quad (14)$$

Обработка данных в блоке БД (3) включает:

1. Нормализацию: Для увеличения информативности данных при обучении нейросети, что обеспечивает также увеличение точности прогнозирования применяется нормализация на основе формулы максимума-минимума (15):

$$P_{\text{норм}} = \frac{P_{\text{факт}} - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}, \quad (15)$$

где $P_{\text{факт}}$ – нормируемое значение, $P_{\min}$ – минимальное значение P в массиве данных, $P_{\max}$ – максимальное значение P в массиве данных.

Работает устройство следующим образом. Значения потреблённой мощности, снимаемые со счетчика электроэнергии, поступают в блок обработки данных (9), в блок оценки приспособленности НС (6) и в блок вывода рекомендаций (10). Регистрируемые неэлектрические параметры также поступают в блок обработки данных (9). Блок хранения данных (8) принимает данные из блока обработки данных (9), хранит в себе значения потреблённой электроэнергии и формирует выборки данных, а также хранит лучшие НС-модели с различными конфигурациями гиперпараметров. Блок обучения НС (4) выполняет подбор гиперпараметров НС-модели при помощи генетического алгоритма (рис. 3) и обучение с использованием метода обратного распространения ошибки. Обученная модель направляется в блок НС-модель прогнозирования (7). Команду на начало обучения блок может получить как вручную, так и как результат работы блока оценки приспособленности НС (6).

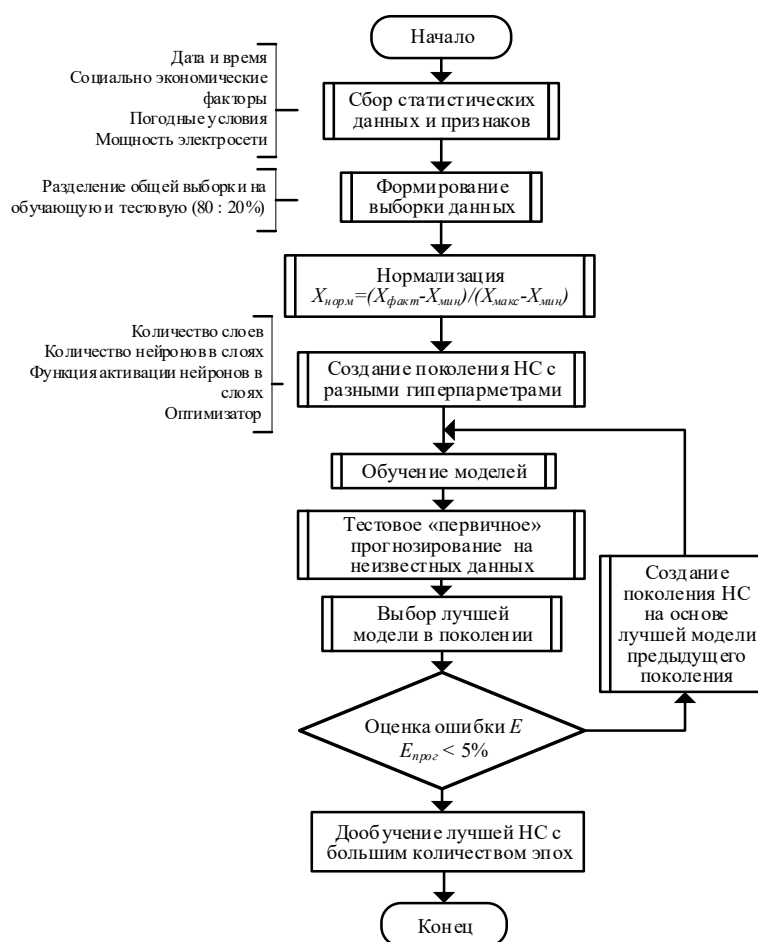


Рис. 3. Генетический алгоритм работы устройства упреждающего прогнозирования режимов энергопотребления и помощи принятия решений

Блок оценки приспособленности НС (6) производит расчет ошибки прогнозирования на основании значений, полученных из блока НС-модель прогнозирования (7) и фактического значения потреблённой ЭЭ, снимаемых со счетчиков электроэнергии. В случае, когда рассчитанное значение ошибки превышает заданное, блок оценки приспособленности НС (6) подает команду на начало подбора гиперпараметров в блок (5), далее производится обучение НС-модели в блоке обучения НС.

Система помощи принятия решений работает следующим образом:

Блок анализа ЭП (11) выполняет сравнение объема заказанной ЭЭ ($P_{\text{зад}}$) и прогноз-ного значения потребленной ЭЭ ($P_{\text{прог}}$) за обозреваемый период. Рассчитанная погреш-ность (ϵ_r) направляется в блок вывода рекомендаций (10).

Блок вывода рекомендаций (10) производит расчет отклонения прогнозных величин потребленной мощности ($P_{\text{прог}}$) от фактических ($P_{\text{потр}}$) на основании данных, снимаемых со счетчика ЭЭ и полученных в результате работы блока НС-модель прогнозирования (7). Производит обработку и преобразование данных, поступающих к диспетчеру РЭС в удобный вид.

Из блока вывода рекомендаций (10) снимаются следующие данные: $F_{\text{рф}}$ (фактиче-ская потребленная мощность), $P_{\text{прог}}$ (прогнозная мощность) ϵ_r (ошибка прогнозирова-ния) графики зависимости $P_{\text{прог}}(t)$ и $P_{\text{факт}}(t)$, график отклонения прогноза для потребления ЭЭ выше среднего значения за рассматриваемый период (фиг. 2), сообщения об увеличе-нии отклонения прогнозирования больше заданного предела и начале переобучения.

На основании полученных данных оператор РЭС принимает решение о заказе необ-ходимого объема ЭЭ ($\Sigma P_{\text{прог}}$), получает возможность контролировать возможные всплес-ки и снижения потребления ЭЭ у потребителя, ненормированную работу оборудования, а также дополнительно контролировать адекватность работы НС-модели.

Генетический алгоритм оптимизации гиперпараметров НС-модели, приведенный на рис. 3, включает в себя следующие этапы:

1. Сбор ключевых статистических данных и признаков, необходимых для прогноза:
 - a. показания мощности электропотребления ($P_{\text{потр}}$, $Q_{\text{потр}}$);
 - b. погодные условия (Дождь, ветер, температура) (R , W , T);
 - c. дата и время снятия показаний (D , M , Y , t);
 - d. статус дня (Рабочий / Выходной день) (S) (1/0).
2. Формирование выборки данных.
3. Нормализация данных – значения данных нормализуются в области определения $[0, 1]$:

$$X_{\text{норм}} = (X_{\text{факт}} - X_{\text{min}}) / (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}).$$

Нормализация проводится с целью увеличения информативности данных для НС и снижения влияния значений, изменяющихся в слишком большом или в слишком малом диапазоне.

4. Создание поколения НС с разными гиперпараметрами. Создается поколение ней-ронных сетей, которые будут иметь случайно заданные гиперпараметры – хромосомы в которые входят:

- a. количество слоев в НС (j);
- b. количество нейронов в слое (n);
- c. функция активации нейронов для каждого слоя (Fa);
- d. оптимизатор, используемый при обучении (O).

Популяция – набор всех пробных решений (особей) в поколении. Размер популяции (НС-модели с различным набором гиперпараметров – хромосом) и поколения задается вручную.

Поколение n нейронных сетей с гиперпараметрами задается следующими массивами:

$$T_m [l_1, l_2, \dots l_n],$$

где длина массива T указывает на количество слоев в НС, а каждый элемент массива обо-значает количество нейронов в j слое:

$$F_m [f_1, f_2, \dots f_n].$$

где длина массива F соответствует количеству слоев в НС, а каждый элемент массива обозначает функцию активации для каждого j слоя:

$$O [o_1, o_2, \dots o_m].$$

Массив номеров оптимизаторов, где длина массива указывает на количество НС в поколении.

Каждая m модель НС создается, с использованием гиперпараметров записанных в массивы:

$$F_m, T_m, O[o_m].$$

5. Цикл обучения нейронных сетей методом обратного распространения ошибки с использованием генетического алгоритма. Цикл включает в себя:

- ♦ обучение НС с использованием метода обратного распространения ошибки;
- ♦ проверка НС на тестовой выборке;
- ♦ выбор лучшей НС из поколения.

6. Сравнение результата с желаемым проводится вручную оператором, с целью получения наибольшей точности.

- a. Если результат не удовлетворительный, то запускаем процесс обучения НС на основе лучшей модели предыдущего поколения. И переходим к пункту 5.
- b. Если результат удовлетворительный, то повторно обучаем лучшую НС в течении большего количества эпох, чтобы увеличить точность прогноза.

Суть оптимизации с использованием ГА заключается в автоматизированном подборе наиболее оптимальных гиперпараметров нейронной сети для выполнения конкретной задачи. Преимуществом предлагаемого устройства, перед известными, является:

1) увеличение точности прогнозирования благодаря возможности НС-модели приспособиваться к конкретному потребителю энергии, благодаря введению ГА подбора гиперпараметров НС-модели;

2) ввод блока СППР, позволяет: выявлять тенденцию изменения ЭП; реализовать систему упреждающего управления ЭП, учитывающую воздействующие факторы (метео; социально-экономические; режимы работы оборудования);

3) введение блоков подсистема прогнозирования и СППР повышает эффективность работы электросети благодаря предоставлению необходимой оператору ДУ РЭС информации для принятия решений;

4) ввод блока анализа ЭП, выполняющего расчет погрешности соответствия заказанной ЭЭ и прогнозной позволяет своевременно корректировать необходимый объем ЭЭ, тем самым сокращая финансовые затраты на покупку ЭЭ.

Оценка качества работы нейронной сети. Для оценки качества работы нейросетевых моделей существует множество различных метрик. При построении модели и оценке ее работоспособности крайне важным является выбрать корректную (соответствующую задаче и природе данных) метрику [18]. Для задач регрессии применяются следующие метрики [17, 18]. Исследовано влияние различных метрик на точность прогнозирования электропотребления для данных с аддитивным профилем. Рассматривалось три присоединения, в качестве функции потерь использовалась функция Хьюбера. При исследовании использовалась НС-модель с экспериментально установленной структурой: кол-во скрытых слоев – 3; кол-во нейронов на слой – 40 40 30; BatchSize – 250; кол-во эпох – 60; функция активации – ReLU для всех слоев. Исследовались такие метрики как: Ассигасу и MAE. Результаты расчета средней погрешности прогнозирования электроэнергии для различных потребителей (AP-103, AP-204, AP-304) сведены в табл. 1.

Таблица 1

Погрешности прогнозирования при различных метриках

Метрика	Погрешность (средняя), %		
	AP-103 присоединение	AP-204 присоединение	AP-304 присоединение
MAE	3.6	1.53	14.93
Accuracy	0.92	19.48	1.03

На рис. 4. приведены графики сравнения полученных прогнозных и фактических значений электропотребления (за месяц) при использовании различных метрик, для одного из потребителей (AP-103).

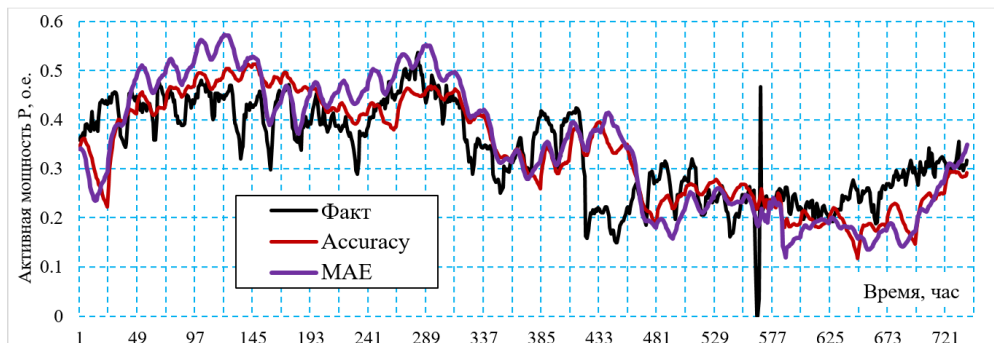


Рис. 4. Графики сравнения прогнозных и фактических значений для AP-103

Построение робастной НС-модели и оценка точности ее прогноза. Исследовано влияние на погрешность прогнозирования ЭП применения робастных функций потерь вместо классической MSE. Робастный подход, является альтернативой классическим методам. Он позволяет не исключать нетипичные наблюдения, а снизить их негативное влияние при обучении модели и, тем самым, добиться достаточно высокой точности работы модели при анализе зашумленных данных. При решении других задач машинного обучения, однако, такой подход до сих пор используется не очень часто. [18]. В работе рассматривались такие робастные функции потерь как:

1) Хьюбера

$$\begin{cases} \frac{1}{2}z^2, & |z| \leq \beta \\ \beta|z| - \frac{1}{2}\beta^2, & |z| > \beta \end{cases}$$

2) Коши (Лоренца)

$$\ln\left(\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\beta}\right)^2 + 1\right).$$

Тестирование применимости робастной функции производилось с использованием двух способов формирования нейросети:

1. Создание НС фиксированной структуры, задаваемые параметры: кол-во скрытых слоев – 3; кол-во нейронов на слой – 40 40 30; BatchSize – 250; кол-во эпох – 60; функция активации – ReLU для всех слоев.

2. Создание НС при помощи разработанного генетического алгоритма подбора параметров.

Исследовались потребители со следующими профилями ЭП: 1 – циклический; 2 – аддитивный; 3 – аддитивно-сезонный; 4 – аддитивно случайный.

Для одного типа потребителя (с различным профилем потребления) приведены графики сравнения фактического электропотребления и спрогнозированного нейросетью, с использованием функций потерь MSE, Хьюбера и Коши, рис. 5.

Проведен расчет ошибки прогнозирования (за месяц) при использовании различных функций потерь, табл. 2.

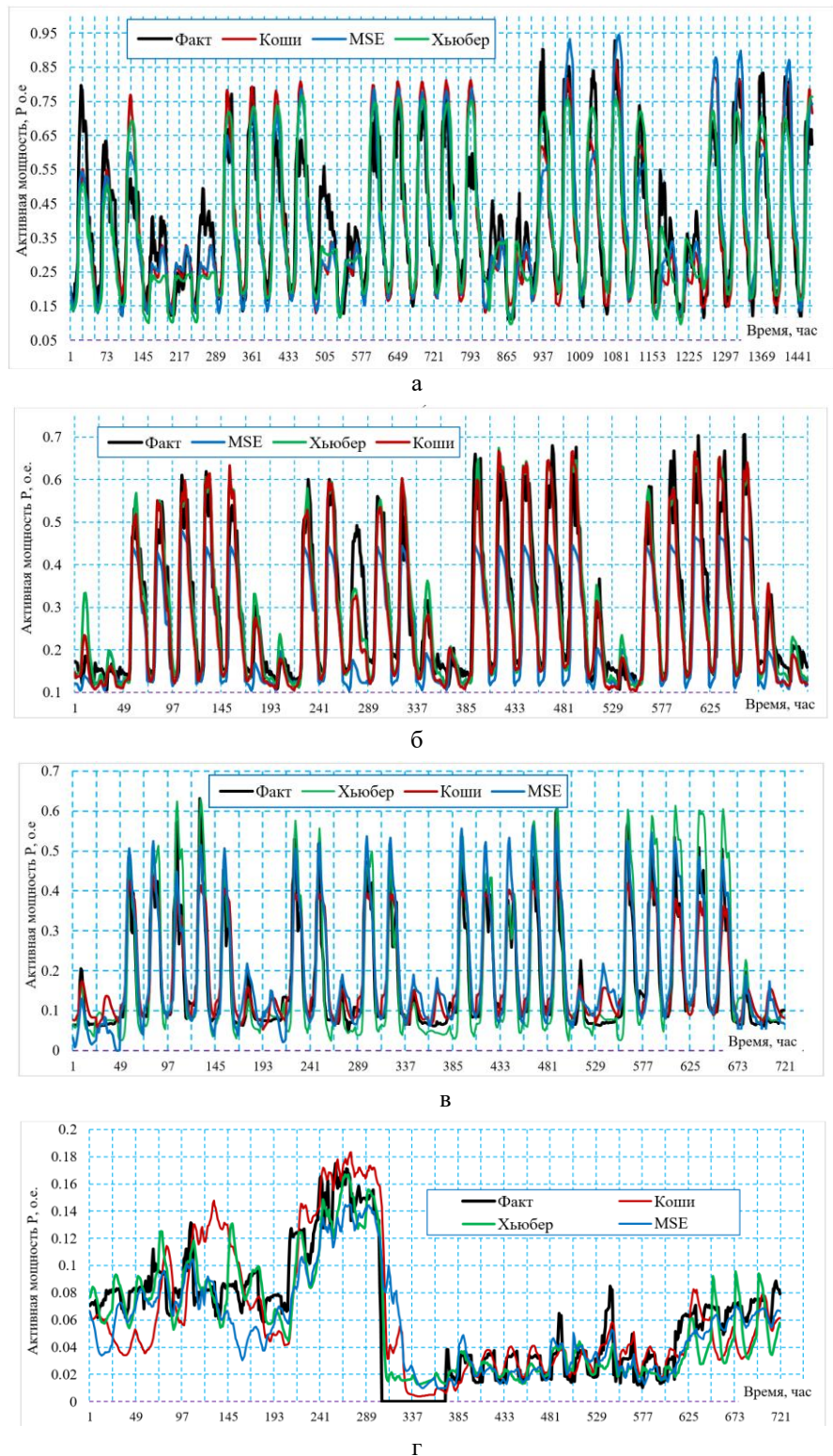


Рис. 5. Сравнение графиков прогноза и фактического ЭП для потребителя:
а – с циклическим профилем; б – с аддитивно-случайным профилем;
в – с аддитивно-сезонным профилем; г – с аддитивным профилем

Таблица 2

Ошибка прогнозирования при использовании различных функций потерь

		Погрешность прогнозирования, %											
Характер потребления электроэнергии		Циклический		Аддитивно-случайный		Аддитивно-сезонный		Аддитивный (MAKP)					
								AP-103		AP-204		AP-304	
		Без СО и ГА	ГА без СО	Без ГА, со СО	ГА без СО,	Без СО и ГА	Без СО и ГА	Без СО и ГА	ГА+ СО	СО без ГА	ГА+ СО	СО без, ГА	ГА+ СО
Месяц	MSE	5.75	3.56	4.07	2.42	20.5	8.08	5.58	2.04	11.08	7.97	10.11	9.9
	Хьюбер	5.46	1.16	9.78	0.38	11.7	2.77	2.48	1.3	4.97	3.55	6.06	3.77
	Коши	5.77	3.1	8.4	5.02	12.26	6.93	9.8	8.78	20.7	12.19	8.01	7.51

Анализ результатов проведенного исследования показал:

- ♦ Для потребителей ЭЭ с циклическим профилем лучше всего себя показывают функции потерь MSE и Хьюбера, снижение ошибки до 2%. Важно отметить, что для потребителей с циклическим профилем и в случаях, где прослеживается закономерность в потреблении ЭЭ, применение скользящего окна вызывает значительное увеличение ошибки.

- ♦ Для потребителя с аддитивно-случайным профилем без использования ГА лучше всего показала себя функция потерь MSE, снижение ошибки до 4%.

- ♦ Для потребителя с аддитивно-сезонным профилем применение СО без генетического алгоритма вызывает значительное снижение точности прогнозирования вплоть до 60-70%. Без использования ГА лучше всего показала себя функции потерь Хьюбера и Коши, снижение ошибки до 9%.

- ♦ Для потребителей с аддитивным профилем наибольшую эффективность показала робастная функция потерь Хьюбера. Снижение точности по сравнению с MSE – до 6-7%. Для потребителей с таким профилем целесообразно использовать метод СО, который положительно сказывается на точности прогнозирования.

- ♦ Использование ГА подбора гиперпараметров НС позволяет добиться снижения ошибки прогнозирования в среднем на 8%. Следует отметить необходимость дообучения созданной НС-модели на большем количестве эпох (700-800). BatchSize устанавливается либо использованный во время работы ГА – в данном случае 250, либо меньше – 150-200.

Заключение. В задачах прогнозирования электропотребления с использованием нейросетевой-модели, независимо от способа создания структуры, выявлено что, наилучшей метрикой является метрика MAE, по сравнению с ассигасу в среднем до 9%. Для потребителей с аддитивными профилями потребления электроэнергии целесообразно использовать робастную функцию потерь Хьюбера, а для потребителей с циклическим или имеющим закономерности профиле потребления электроэнергии применение скользящего окна увеличивает ошибку, в отличие от аддитивных потребителей; применение генетического алгоритма значительно увеличивает точность прогнозирования благодаря индивидуальному подбору оптимальных параметров для конкретного потребителя. Новизной разработанной структуры интеллектуального устройства прогнозирования режимов энергопотребления, является система помощи принятия решений, позволяющая реализовать планово-упреждающее управление, основываясь на данных, снимаемых со счетчика электроэнергии и полученных в результате работы нейросетевой модели прогнозирования. Преимуществом системы помощи принятия решений является расчет отклонения

прогнозных величин потребленной мощности от фактических и как результат – выдача лицу, принимающему решение, распределительных энергосетей рекомендации. Информационные данные от системы помощи принятия решений помогают оператору распределительных энергосетей принимать взвешенное решение о заказе необходимого объема электроэнергии, контролировать вероятные всплески и снижения потребления электроэнергии у потребителя, ненормированную работу электрооборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства РФ от 9 сентября 2023 г. N 1473 "Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности"// Размещен в СПС "Консультант Плюс". – <https://base.garant.ru/407632842/>.
2. *Полуянович Н.К.* Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. Сер. учебники для вузов. Специальная литература. – 3-е изд., стереотипное. – СПб., 2017.
3. *Родыгина С.В.* Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения. Передача, распределение, преобразование электрической энергии: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 72 с.
4. *Серебряков Н.А., Хомутов С.О.* Анализ случайной составляющей временного ряда электрической нагрузки группы точек поставки электроэнергии сельхозпроизводителей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 5 (175). – С. 153-158.
5. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Оценка воздействующих факторов и прогнозирование электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режима ее эксплуатации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 2 (226). – С. 31-46.
6. *Рудаков Е., Саакян Ю., Нигматулин Б., Прохорова Н.* Цена расточительности // Эксперт. – Июнь 2008. – № 24.
7. *Билалова А.И.* Статистика потребления электроэнергии в г. Ульяновск // Вузовская наука в современных условиях: Сб. материалов 48-й научно-технической конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – С. 15-18.
8. *Доманов В.И., Билалова А.И.* Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 59-65. – DOI: 10.14529/power160208.
9. *Кудрин Б.И., Мозгалин А.В.* Методика обеспечения почасового прогнозирования электропотребления предприятий с учетом погодных факторов // Вестник МЭИ. – 2007. – № 2. – С. 45-47.
10. Патент 115098 РФ: МПК G06N 5/00. Многослойная нейронная сеть / Белов К.Д.; заявитель и патентообладатель: Белов К.Д. – №2011139784/08; заявл. 29.09.2011; опубл. 20.04.2012, Бюл. № 11.
11. Патент 169425 РФ: МПК G06Q 10/06, G06N 5/00. Устройство прогнозирования электропотребления на основе многослойной нейронной сети / Хамитов Р.Н.; заявитель и патентообладатель: ФБГОУ ВО Омский государственный технический университет – 2016145339; заявл. 18.11.2016; опубл. 17.03.2016.
12. Патент 222420 РФ: МПК G06N 5/00, G06Q 10/06. Устройство мониторинга и прогнозирования электропотребления в электроэнергетических системах на основе нейронных структур / Качаев О.В., Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.; патентообладатель: Южный федеральный университет. 2023126166; заявл. 12 октября 2023; опубл. 25 декабря 2023 г.
13. *Сивак М.А., Тимофеев В.С.* Построение робастных нейронных сетей с различными функциями потерь // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 2 (82). – С. 67-82. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-67-82.
14. *Haykin S.* Neural Networks and Learning Machines. – 3rd ed. – Pearson Education, 2009. – 906 p.
15. *Bishop C.M.* Neural Networks for Pattern Recognition. – New York, US: Oxford University Press, 1995. – 502 p.
16. *Brownlee J.* A Gentle Introduction to the Rectified Linear Unit (ReLU). – 2019. – URL: <https://inlnk.ru/agw2E2> (visited on 02/19/2022).
17. *GeeksforGeeks* A computer science portal for geeks. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/regression-metrics/>.
18. *Сивак М.А.* Робастное обучение нейронных сетей с простой архитектурой для решения задач классификации: дисс. ... канд. наук: 05.13.17. – Новосибирск: НГТУ, 2022. – 111 с.
19. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.

20. Полуянович Н.К., Бурьков Д.В., Дубяго М.Н. Нейросетевой метод прогнозирования электропотребления и его инструментальная реализация: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2023. – 151 с.
21. Пальчевский Е.В. Методы нейросетевой обработки больших темпоральных данных для информационной поддержки принятия управленческих решений (на примере электроэнергетики): дисс. ... канд. техн. наук: 2.3.1.. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024.

REFERENCES

1. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 9 sentyabrya 2023 g. N 1473 "Ob utverzhdenii kompleksnoy gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii "Energoberezhenie i povyshenie energeticheskoy effektivnosti" [Resolution of the Government of the Russian Federation of September 9, 2023 N 1473 "On approval of the comprehensive state program of the Russian Federation "Energy saving and increasing energy efficiency"], *Razmeshchen v SPS "Konsul'tant Plus"* [Posted in the SPS "Consultant Plus"]. Available at: <https://base.garant.ru/407632842/>.
2. Poluyanovich N.K. Montazh, naladka, ekspluatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Ser. uchebniki dlya vuzov. Spetsial'naya literature [Installation, adjustment, operation and repair of power supply systems of industrial enterprises. Series of textbooks for universities. Special literature]. 3rd ed. Saint Petersburg, 2017.
3. Rodygina S.V. Proektirovanie i ekspluatatsiya sistem elektrosnabzheniya. Peredacha, raspredelenie, preobrazovanie elektricheskoy energii: ucheb. posobie [Design and operation of power supply systems. Transmission, distribution, transformation of electrical energy: a textbook]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2017, 72 p.
4. Serebryakov N.A., Khomutov S.O. Analiz sluchaynoy sostavlyayushchey vremennogo ryada elektricheskoy nagruzki gruppy tochek postavki elektroenergii sel'khozproizvoditeley [Analysis of the random component of the time series of the electric load of a group of electricity supply points of agricultural producers], *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2019, No. 5 (175), pp. 153-158.
5. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Otsenka vozdeystviyushchikh faktorov i prognozirovaniye elektropotrebleniya v regional'noy energosisteme s uchedom rezhima ee ekspluatatsii [Assessment of influencing factors and forecasting of electricity consumption in the regional energy system, taking into account its operating mode], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 2 (226), pp. 31-46.
6. Rudakov E., Saakyan Yu., Nigmatulin B., Prokhorova N. Tsena rastochitel'nosti [The Price of Waste-fulness], *Ekspert* [Expert], Iyun' 2008, No. 24.
7. Bilalova A.I. Statistika potrebleniya elektroenergii v g. Ul'yanovsk [Statistics of Electricity Consumption in Ulyanovsk], *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh: Sb. materialov 48-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [University Science in Modern Conditions: Collection of Materials of the 48th Scientific and Technical Conference]. Ul'yanovsk: UlGTU, 2013, pp. 15-18.
8. Domanov V.I., Bilalova A.I. Prognozirovaniye ob'emov energopotrebleniya v zavisimosti ot iskhodnoy informatsii [Forecasting energy consumption volumes depending on the initial information], *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series "Power Engineering"], 2016, Vol. 16, No. 2, pp. 59-65. DOI: 10.14529/power160208.
9. Kudrin B.I., Mozgalin A.V. Metodika obespecheniya pochasovogo prognozirovaniya elektropotrebleniya predpriyatiy s uchedom pogodnykh faktorov [Methodology for ensuring hourly forecasting of electricity consumption of enterprises taking into account weather factors], *Vestnik MEI* [Bulletin of MPEI], 2007, No. 2, pp. 45-47.
10. Belov K.D. Patent 115098 RF: MPK G06N 5/00. Mnogosloynnaya neyronnaya set' [Patent 115098 of the Russian Federation: IPC G06N 5/00. Multilayer neural network]; applicant and patent holder: Belov K.D. – No. 2011139784/08; declared 29.09.2011; published 20.04.2012, Bulletin No. 11.
11. Khamitov R.N. Patent 169425 RF: MPK G06Q 10/06, G06N 5/00. Ustroystvo prognozirovaniya elektropotrebleniya na osnove mnogosloynnoy neyronnoy seti [Patent 169425 of the Russian Federation: IPC G06Q 10/06, G06N 5/00. Device for predicting electricity consumption based on a multilayer neural network]; applicant and patent holder: Omsk State Technical University – 2016145339; declared 18.11.2016; published 17.03.2016.
12. Kachelaev O.V., Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Patent 222420 RF: MPK G06N 5/00, G06Q 10/06. Ustroystvo monitoringa i prognozirovaniya elektropotrebleniya v elektroenergeticheskikh sistemakh na osnove neyronnykh struktur [Patent 222420 of the Russian Federation: IPC G06N 5/00, G06Q 10/06. Device for monitoring and forecasting electricity consumption in electric power systems based on neural structures]; patent holder: Southern Federal University. 2023126166; declared October 12, 2023; published December 25, 2023.

13. *Sivak M.A., Timofeev V.S.* Postroenie robastnykh neyronnykh setey s razlichnymi funktsiyami poter' [Construction of robust neural networks with different loss functions], *Sistemy analiza i obrabotki dannykh* [Systems of data analysis and processing], 2021, No. 2 (82), pp. 67-82. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-67-82.
14. *Haykin S.* Neural Networks and Learning Machines. 3rd ed. Pearson Education, 2009, 906 p.
15. *Bishop C.M.* Neural Networks for Pattern Recognition. New York, US: Oxford University Press, 1995, 502 p.
16. *Brownlee J.* A Gentle Introduction to the Rectified Linear Unit (ReLU), 2019. Available at: <https://inlnk.ru/agw2E2> (visited on 02/19/2022).
17. *GeeksforGeeks* A computer science portal for geeks. Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/regression-metrics/>.
18. *Sivak M.A.* Robastnoe obuchenie neyronnykh setey s prostoy arkhitekturoy dlya resheniya zadach klassifikatsii: diss. ... kand. Nauk [Robust training of neural networks with simple architecture for solving classification problems: cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.17. Novosibirsk: NGTU, 2022, 111 s.
19. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Sovershenstvovanie metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektrozolyatsionnykh materialov sistem energosnabzheniya: monografiya [Improving methods for diagnostics and forecasting of electrical insulating materials of power supply systems: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 192 p.
20. *Poluyanovich N.K., Bur'kov D.V., Dubyago M.N.* Neyrosetevoy metod prognozirovaniya elektropotrebleniya i ego instrumental'naya realizatsiya: monografiya [Neural network method for forecasting electricity consumption and its instrumental implementation: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2023, 151 p.
21. *Pal'chevskiy E.V.* Metody neyrosetevoy obrabotki bol'shikh temporal'nykh dannykh dlya informatsionnoy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy (na primere elektroenergetiki): diss. ... kand. tekhn. nauk [Methods of neural network processing of big temporal data for information support of management decisions (on the example of the electric power industry): cand. of eng. sc. diss.]: 2.3.1. Ufa: Ufimskiy universitet nauki i tekhnologii, 2024.

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Качелаев Олег Вадимович. – Южный федеральный университет; e-mail: 22.olezhka@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89281163960; кафедра техносферной безопасности и химии; аспирант.

Дубяго Марина Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the Department of Electric Technics and Mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kachelaev Oleg Vadimovich – Southern Federal University; e-mail: 22.olezhka@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281163960; the Department of Techno-sphere Safety and Chemistry; postgraduate student.

Dubyago Marina Nikolaevna – Southern Federal University; e-mail: w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; Taganrog, Russia; the Department of Electrical Engineering and Mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.8

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-118-129

А.Н. Целых, И.А. Валухов, Л.А. Целых

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ КОРТЕЖЕЙ ИЗ ТЕКСТА НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Рассматривается проблема разработки модели извлечения полных причинных кортежей из неструктурированных текстов для представления ситуаций принятых решений в сложных социально-гуманитарных средах. Совокупность извлекаемых кортежей из определенного набора текстов представляет собой связанные сущности конкретной среды, что позволяет создать причинно-следственные графы. В этой статье предлагается модель извлечения причинно-следственных

связей с использованием предобученной модели BERT с дообучением на основе дополнительных признаков. Для уточнения причинной классификации модель использует два вида признаков (каузальность глаголов и метрики качества причинного влияния) для распознавания причинного кортежа, автоматически изучает семантические признаки из предложений, повышая точность извлечения. Предварительная обработка текста осуществляется с помощью библиотеки SpaCy с открытым исходным кодом. Извлеченные причинно-следственные кортежи в формате <фраза причины, фраза глагола, фраза следствия, полярность> легко трансформируются в соответствующие элементы графа <исходящий узел, направление связи, входящий узел, знак веса связи> и далее могут быть использованы для построения направленного взвешенного знакового графа с детерминированной причинностью на дугах. В целях снижения зависимости от внешних знаний для дообучения и тестирования модели BERT используются синтетически сгенерированные аннотированные наборы данных. Экспериментальные результаты показывают, что точность извлечения причинно-следственных связей на синтетических данных достигает 94%, а значение F1 – 95%. Преимуществами представленного технологического решения является то, что модель не требует высоких эксплуатационных затрат, реализована на компьютере со стандартными характеристиками, использует свободное программное обеспечение, что делает ее доступной для широкого круга пользователей. Ожидается, что предложенная модель может быть использована для автоматизации анализа текстов и поддержки принятия решений в условиях высокой неопределенности, что особенно актуально для социогуманитарных сред.

Извлечение причинно-следственных связей; глубокое обучение; BERT; когнитивные каузальные модели; графовое представление; обработка текстов на естественном языке; автоматизированное обучение; поддержка принятия решений.

A.N. Tselykh, I.A. Valukhov, L.A. Tselykh

APPLYING DEEP LEARNING TO EXTRACT CAUSALITY FROM TEXT USING SYNTHETIC DATA

This article addresses the problem of developing a causal full-tuples extraction model from unstructured texts to represent decision-making situations in complex social and humanitarian environments. We present a causal full-tuples extraction model using a pre-trained BERT with additional feature-based special fine-tuning. To refine the causal classification, the model uses two types of features (verb causality and cause-and-effect quality metrics) to recognize a causal tuple, automatically extracts semantic features from sentences, increasing the accuracy of extraction. Text preprocessing is performed using the open source SpaCy library. The extracted cause-and-effect tuples in the format <cause phrase, verb phrase, effect phrase, polarity> are easily transformed into the corresponding elements of the graph <outgoing graph node, graph arc direction, incoming graph node, graph connection weight sign> and can then be used to construct a directed weighted signed graph with deterministic causality on arcs. In order to reduce dependence on external knowledge, synthetic generated annotated datasets are used to fine-tune and test the BERT model. Experimental results show that the accuracy of extracting cause-and-effect relationships on synthetic data reaches 94%, and the F1 value is 95%. The advantages of the presented technological solution are that the model does not require high operating costs, is implemented on a computer with standard characteristics, uses free software, which makes it accessible to a wide variety of users. It is expected that the proposed model can be used to automate text analysis and support decision-making in conditions of high uncertainty, which is especially important for social and humanitarian environments.

Extracting causal relationships; deep learning; BERT; cognitive causal models; graph representation; natural language processing; automated learning; decision support.

Введение. В современном мире извлечение причинно-следственных связей становится все более важным для многих задач обработки естественного языка (Natural Language Processing, NLP) [1]. Однако поиск универсальной модели усложнен из-за неоднозначности смыслов и разнообразия текстов на естественном языке. Поэтому извлечение причинно-следственных связей остается сложной задачей NLP.

Существующие методы используют шаблоны, ограничения и методы машинного обучения для извлечения причинности. Традиционные подходы к извлечению причинно-следственных связей требуют ручной аннотации и обработки текста, что может быть трудоемким и неэффективным, а также в значительной степени зависят от знаний предметной области [2]. С развитием методов глубокого обучения предварительно обученные

языковые модели вывели современные методы извлечения причинно-следственных отношений на новый уровень, позволяя максимально автоматизировать процесс извлечения полных причинных кортежей с высокой точностью [3, 4].

В данном исследовании рассматривается проблема разработки модели извлечения полных причинных кортежей из неструктурированных текстов для дальнейшего представления ситуаций принятий решений в сложных социогуманитарных средах. Рассматривая совокупность извлекаемых кортежей из определенного набора текстов, как связанные сущности конкретной среды, возможно создать графовое представление ситуации, функционирования системы, представление о предметной области. Создание таких графов на основе извлечения причинно-следственных связей рассматривалось в работах [5–7]. Однако, надо отметить, высокую трудоемкость предлагаемых решений.

В этом исследовании используется предобученная модель BERT (Bidirectional Encoder Representation from Transformers) [3, 8] с дообучением на основе дополнительных признаков для построения модели извлечения причинно-следственных связей с целью повышения точности. Эта модель позволяет классифицировать слова в предложении и выявлять полные причинные кортежи с высокой точностью [3]. Для уточнения причинной классификации при дообучении дополнительно учитывались следующие признаки: каузальность глаголов и качество причинного влияния в причинном кортеже. Модель использует эти два вида признаков, автоматически изучает семантические признаки из предложений, снижая зависимость от внешних знаний и повышая точность извлечения. Далее извлеченные причинно-следственные кортежи могут быть использованы для построения направленного взвешенного знакового графа с детерминированной причинностью на дугах. В зависимости от целей применения, такие графы имеют в литературе разные названия – граф знаний [9], причинно-ассоциативная сеть (causal-associational network, CASNET) [10], когнитивная карта [11].

Важным условием использования методов машинного обучения для задач извлечения причинно-следственных связей является создание аннотированных наборов данных. В связи с экспоненциальным расширением человеческих знаний и накоплением огромных массивов текстовых данных, ручная маркировка данных нереалистична. Тогда применение методов глубокого обучения для создания синтетических данных представляется обоснованным решением. В рамках работы мы использовали для дообучения и тестирования модели BERT синтетически сгенерированные наборы данных. Экспериментальные результаты показывают, что точность извлечения причинно-следственных связей достигает 94%, а значение F1 – 95%.

Преимуществом нашей работы является также то, что модель реализована на компьютере со стандартными характеристиками, не требующем высоких эксплуатационных затрат, что делает ее доступной для широкого круга пользователей. Результаты наших исследований демонстрируют приемлемую эффективность предложенного подхода и показывают возможности применения методов глубокого обучения в задачах извлечения причинно-следственных связей.

Обзор публикаций, связанных с темой исследования. В данном разделе мы рассмотрим ключевые работы, посвященные методам и моделям, которые используются для решения этой задачи, а также их применимость к нашей теме.

Традиционные методы извлечения причинно-следственных связей часто основаны на правилах и шаблонах, которые требуют ручной аннотации и обработки текста. Например, в работе [12] описывается подход, основанный на использовании лексических и синтаксических шаблонов для выявления причинно-следственных отношений в тексте. Однако такие методы часто оказываются трудоемкими и недостаточно гибкими для обработки разнообразных текстовых данных. С развитием машинного обучения появились более эффективные методы автоматического извлечения причинно-следственных связей. В работе [13] предложен подход, основанный на использовании классификаторов машинного обучения, таких как Support Vector Machines (SVM), для выявления причинно-следственных отношений в тексте. Авторы используют различные лингвистические признаки, части речи, зависимости между словами и семантические роли, для улучшения

качества классификации. Графовое представление причинно-следственных связей является важным аспектом в задачах анализа текста. В работе [14] предложен метод построения графов причинно-следственных связей с использованием глубокого обучения. Авторы используют архитектуру GNN для моделирования сложных зависимостей между сущностями в тексте. Этот подход позволяет эффективно представлять причинно-следственные связи в виде графа, что может быть полезно для дальнейшего анализа и визуализации. В последние годы глубокое обучение и предобученные языковые модели, такие как BERT, стали основным инструментом для решения задач NLP, включая извлечение причинно-следственных связей. В работе [15] предложен подход, основанный на использовании BERT для классификации причинно-следственных отношений в тексте. Авторы демонстрируют, что BERT позволяет достичь высокой точности благодаря своей способности учитывать контекст и семантические связи между словами.

Оценка эффективности моделей извлечения причинно-следственных связей является важным аспектом исследований. В работе [16] предложен метод оценки моделей на основе метрик F1-оценки и точности. Авторы подчеркивают важность учета энергоэффективности и экономичности моделей, что особенно актуально для практического применения в условиях ограниченных ресурсов. Этот подход согласуется с нашей задачей, где мы также учитываем параметры эффективности модели.

В данном разделе мы рассмотрели ключевые работы, посвященные методам и моделям извлечения причинно-следственных связей из текста. Традиционные подходы, основанные на правилах и шаблонах, уступают по эффективности современным методам машинного обучения и глубокого обучения. Предобученные языковые модели, такие как BERT, демонстрируют высокую точность и гибкость в задачах извлечения причинно-следственных связей.

Модель извлечения причинно-следственных связей. Постановка проблемы. В этом разделе мы представляем модель извлечения причинно-следственных кортежей из текста для графового представления ситуаций принятия решения в сложных социогуманитарных средах. Состояние среды может быть описано системой институциональных факторов (социальных, экономических, экологических, культурных, политических, технологических), составляющих и определяющих эту среду, с их причинно-следственными связями. Распространенным формальным представлением, описывающим состояние такой среды, является когнитивная каузальная модель (ККМ), описываемая в виде направленного взвешенного знакового графа с детерминированной причинностью на дугах. Граф ККМ предназначен для моделирования стратегий управляющих воздействий при принятии управленческих решений лицом, принимающим решения (ЛПР), в ситуациях высокой цены. Примеры и описание таких графовых представлений описаны в [17–19]. С учетом вышеизложенного, с целью максимального снижения субъективности ККМ извлечение причинных отношений должно быть ограничено явной причинностью, выраженной в тексте.

Тогда, исходя из формализма графового представления ситуативной среды необходимыми условиями формирования кортежа являются асимметричный и полярный характер причинности, выражающийся, соответственно, в направленности и полярности причинных отношений в графе. Направленность определяется последовательностью записи в шаблоне извлечения грамматики *<причина, следствие>*. Полярность выражается в лимитировании корпуса глаголов выражениями, обеспечивающими прямую констатацию качества причинного влияния *<уменьшение | увеличение>*.

Тогда проблема извлечения причинных кортежей из текста для графового представления ККМ описывается следующим образом:

1. Извлечение определяется кортежем в формате *<фраза причины, фраза глагола, фраза следствия, поляризация>*.
2. Идентификация причинности осуществляется на основе следующих правил формирования кортежа.

Пусть $S = [S_1, \dots, S_n] \in R^{1 \times |S|}$ относится к предложению с токенами $|S|$, где каждый токен S_i является словом, включая специальные идентификаторы для указания пары причина-следствие (S_{e1}, S_{e2}) . В этом исследовании используются специальные запросы на семантику глагола (на основе списка каузальных глаголов) как потенциальное альтернативное решение задачи идентификации причинности.

Правило 1. Отбор предложений-кандидатов. Обозначим индикатор маски как $m = [m_1, \dots, m_{|S|}] \in \{0, 1\}^{1 \times |S|}$, где $m_i = 0$, если S_i не является токеном из списка каузальных глаголов *list of verbs*, в противном случае $m_j = 1$, $j \in [1, \dots, |S|]$, $j \neq i$. В результате получаем базовый корпус предложений-кандидатов S_m содержащих каузальные глаголы.

Правило 2. Идентификация полярности. Учитывая базовый корпус входных предложений-кандидатов (S_m) , дискриминатор D исследует наличие причинно-семантической полярности в предложении S_m . $D = [D_m] \in \{-1, 0, +1\}^{1 \times |S_m|}$, где $n_i = -1$, если S_i является токеном из списка слов *decreasing_words*, уменьшающих причинный эффект в причинно-следственной связи, $n_j = +1$, если S_j принадлежит списку слов *increasing_words*, увеличивающих причинный эффект в причинно-следственной связи, в противном случае $m_k = 0$, $k \in [1, \dots, |S|]$, $j \neq i \neq k$. В результате получаем элемент кортежа $\langle \text{полярность} \rangle$.

Дополнительные требования к технологическому решению: использование свободного программного обеспечения, дообучение предобученной модели на синтетических данных без сложной и длительной ручной аннотации данных, низкие показатели эксплуатационных затрат.

Формирование списков глаголов. Извлечение предложений-кандидатов из текста включает процессы фильтрации и определения полярности причинных отношений на основе использования списков каузальных глаголов. Для реализации этих процессов мы использовали два типа списков: список инфинитивных каузальных глаголов и списки качества причинного влияния $\langle \text{уменьшение} \mid \text{увеличение} \rangle$.

В качестве основы для формирования списка инфинитивных каузальных глаголов *list of verbs* использовался словарь причинных глаголов, определенных в лексической базе данных английского языка WordNet, разработанной в Принстонском университете [5, 20]. Список включает 76 глаголов, содержащий 62 глагола из [5] и 11 дополнительных глаголов. Списки качества причинного влияния включают глаголы, отражающие соответственно уменьшение (*decreasing_words*) и увеличение причинного эффекта (*increasing_words*) в причинно-следственной связи.

Соответствующие списки глаголов доступны по адресу https://github.com/igFullStack/Causal_Relation_Extraction_Lists.

Описание модели извлечения причинно-следственных кортежей из текста. Процесс извлечения причинного кортежа включает следующие этапы:

1. Ввод корпуса данных.
2. Препроцессинг текста с использованием библиотеки SpaCy version 3.7.6 с открытым исходным кодом для расширенной обработки естественного языка, написанная на языках программирования Python и Cython [21, 22].
3. Извлечение базового списка предложений-кандидатов для обучения модели Bert в формате $\langle \text{предложение}, \text{фраза глагола} \rangle$ путем фильтрации на основе глаголов с использованием библиотеки SpaCy.
4. Извлечение корпуса причинных кортежей типа 1: $\langle \text{предложение}, \text{фраза глагола}, \text{полярность} \rangle$ с использованием алгоритма определения полярности причинных отношений в кортежах.

5. Извлечение корпуса причинных кортежей типа 2: <фраза причины, фраза глагола, фраза следствия, полярность> с использованием программы Bert version 4.45.2.
6. Оценка кортежей с помощью стандартных метрик для машинного обучения (F1-score, Accuracy, Precision, Recall).

Предлагаемая модель состоит из трех основных частей, которые обеспечивают процесс извлечения причинных кортежей из текстов: (1) *Preprocessing Module*, (2) *Causal Polarity Detection Module*, (3) *Tuple Generation Module*. Архитектурная схема процесса извлечения причинных кортежей показана на рис. 1.

Preprocessing Module предназначен для извлечения базового корпуса предложений-кандидатов для обучения модели Bert на основе естественного языка для задач классификации текста с использованием библиотеки SpaCy. Модуль состоит из двух частей: *Candidate Sentence Extractor* и *Filtering Engine*.

Candidate Sentence Extractor сначала извлекает из сырого необработанного текста в формате .txt, .doc, .docx, .pdf очищенный список предложений *list of sentences*, используя собственную модель *en_core_web_sm* библиотеки SpaCy [11]. Схема алгоритма и программный код процесса генерации списка предложений *list of sentences* приведены соответственно в табл. 1 и на рис. 2. Далее этот список подвергается фильтрации с использованием списка глаголов *list of verbs*. Отфильтрованный базовый корпус предложений-кандидатов *list of candidate sentences* в формате <предложение, фраза глагола> передается в модуль *Causal Polarity Detection Module* для извлечения кортежей типа 1 <предложение, фраза глагола, полярность>.

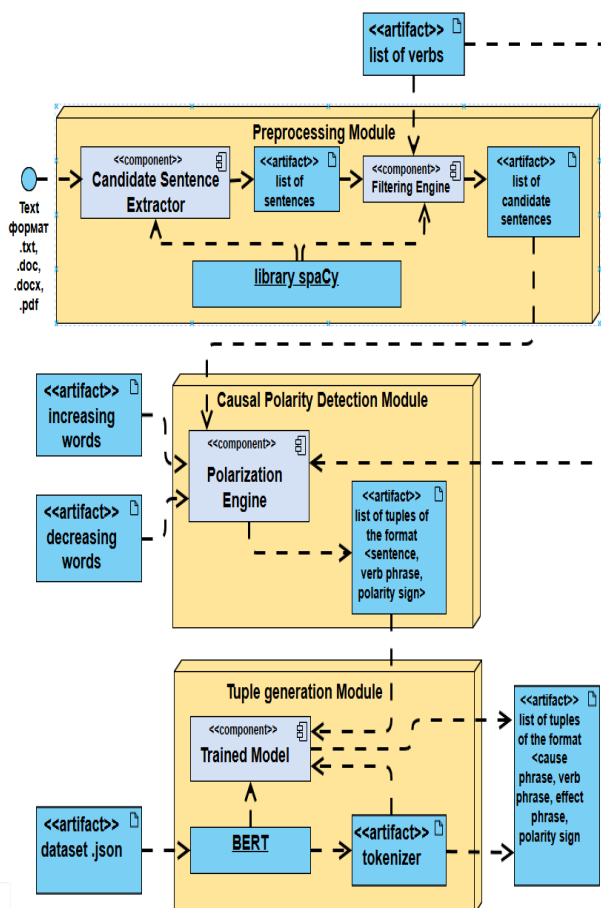


Рис. 1. Архитектурная схема процесса извлечения причинных кортежей

Таблица 1

Алгоритм 1: Схема процесса генерации базового корпуса предложений-кандидатов	
1:	Input: filename; list of verbs;
2:	Output: List of sentences
3:	Function ReadSentencesFromFile(filename):
	# Initialization
4:	sentences <- [];
	# Step 1: Read file content
5:	content <- ReadFileContent(filename);
	# Step 2: Process content using NLP model
6:	doc <- ProcessWithSpaCy(content);
	# Step 3: Extract sentences
7:	sentences <- ExtractSentences(doc);
8:	return sentences;
9:	Function ReadFileContent(filename):
10:	open(filename) as file:
11:	return file.read();
12:	Function ProcessWithSpaCy(content):
13:	return nlp(content);
14:	Function ExtractSentences(doc):
15:	sentences <- [];
16:	for sentence in doc.sents:
17:	sentences.append(sentence.text);
18:	return sentences

```

119 # Функция для чтения предложений из файла
120 def read_sentences_from_file(filename):
121     with open(filename, 'r', encoding='utf-8') as f:
122         content = f.read()
123         sentences = content.splitlines()
124         return [sentence.strip() for sentence in sentences if sentence.strip()] # Удаляем пустые строки и пробелы
125

```

Рис. 2. Код для генерации базового корпуса предложений

Filtering Engine осуществляет фильтрацию предложений-кандидатов на основе глаголов с использованием библиотеки SpaCy и функции *is_causal*. Функция *is_causal* (рис. 3) принимает на вход список предложений и список казуальных глаголов, с помощью SpaCy убирает стоп-слова (артикли, предлоги, союзы и т.п.) из каждого обрабатываемого в цикле предложения, производит токенизацию предложения и выделяет лемму и часть речи каждого токена. Затем функция *is_causal* выводит предложение в список предложений-кандидатов при двух условиях: наличие в предложении токена с частью речи VERB и его леммы в списке казуальных глаголов.

```

83 # Функция для проверки наличия казуальных глаголов в предложении
84 def is_causal(sentence, nlp, causal_verbs, complex_causal_verbs):
85     doc = nlp(sentence)
86
87     # Проверка на наличие сложных казуальных глаголов
88     for verb in complex_causal_verbs:
89         # Генерация всех форм для сложных казуальных глаголов
90         verb_forms = generate_complex_forms(verb)
91         for form in verb_forms:
92             if form in sentence.lower():
93                 return verb
94
95     # Проверка на наличие казуальных глаголов в инфинитивной форме
96     for token in doc:
97         if not token.is_stop and token.pos_ == 'VERB':
98             # Проверка леммы для простых казуальных глаголов
99             if token.lemma_.lower() in causal_verbs:
100                 return token.lemma_.lower()
101
102     return None

```

Рис. 3. Код функции *is_causal*

Causal Polarity Detection Module реализует формирование кортежей формата <предложение, фраза глагола, полярность> на основе списка предложений-кандидатов *list of candidate sentences*, полученного из *Preprocessing Module*, списка каузальных глаголов *list of verbs* и списков *increasing_words* и *decreasing_words*. Псевдокод алгоритма представлен в табл. 2. Алгоритм 2 использует цикл для анализа каждого предложения из списка предложений-кандидатов (рис. 4).

В *Tuple generation Module* реализуется процесс извлечения причинных кортежей формата <фраза причины, фраза глагола, фраза следствия, полярность>. Дообучение модели для извлечения фразы причины и фразы следствия из предложения на основе каузального глагола, происходит на основе предобученной модели BERT и синтетических размеченных данных с аннотациями.

Таблица 2

Алгоритм 2: Алгоритм определения полярности причинных отношений в кортежах	
1:	Input: text; list_of_verbs; increasing_words; decreasing_words;
2:	Output: weight ²
3:	Function CalculateCausalWeight (text, list_of_verbs, increasing_words, decreasing_words):
	weight = 0;
4:	# Step 1: Iterate over tokens in the document
5:	for i, tok in enumerate(text):
	# Step 2: Check if the token is a causal verb
6:	if tok.lemma_lower() in causal_verbs:
	# Step 3: Get the weight of the causal verb
7:	weight = list_of_verbs[tok.lemma_lower()];
	# Step 4: Check if the weight is 0 and adjust it based on modifiers
8:	if weight == 0: weight = AdjustWeightBasedOnModifiers (doc, increasing_words, decreasing_words);
	break;
9:	return weight;
10:	Function AdjustWeightBasedOnModifiers (text, increasing_words, decreasing_words):
11:	# Initialization
	weight = 0;
	# Step 1: Iterate over tokens in the document
12:	for token in text:
	# Step 2: Check if the token is an increasing word
13:	if token.text.lower() in increasing_words:
	# Step 3: Increase the weight
14:	weight = min(1, weight + 1);
	# Step 4: Check if the token is a decreasing word
15:	elif token.text.lower() in decreasing_words:
	# Step 5: Decrease the weight
16:	weight = max(-1, weight - 1);
17:	return weight

² – “weight” обозначает знак полярности в соответствии Правилom 2.

Разметка данных проводилась с помощью генератора обучающего датасета, код которого приведен на рисунке N. Для разметки используются следующие типы меток: O, B-Cause, I-Cause, B-Effect, I-Effect, обозначающие следующие сущности:

- ◆ "Outside" или "Other", т.е. токен не относится ни к одной из определенных сущностей (причине или следствию);
- ◆ B-Cause – начало ("Begin") сущности, обозначающей причину. Метка отмечает первый токен в последовательности, которая относится к причине.

```

294     for i, tok in enumerate(doc):
295         if tok.lemma_.lower() in causal_verbs:
296             weight = causal_verbs[tok.lemma_.lower()]
297
298         # Если вес равен 0, проверяем модификаторы
299         if weight == 0:
300             for token in doc:
301                 if token.text.lower() in increasing_words:
302                     weight = min(1, weight + 1)
303                 elif token.text.lower() in decreasing_words:
304                     weight = max(-1, weight - 1)

```

Рис. 4. Код для определения полярности

♦ I-Cause – внутри ("Inside") сущности, обозначающей причину. Метка отмечает все токены после первого, которые также относятся к причине. Это означает, что все слова, следующие за B-Cause и до следующей сущности или конца предложения, будут помечены как I-Cause, если они являются частью одной и той же причины.

♦ B-Effect – аналогично B-Cause, но обозначает начало сущности, связанной со следствием. Она помечает первый токен последовательности, которая относится к следствию.

♦ I-Effect – аналогично I-Cause, но используется для сущности, обозначающей следствие. Все токены после B-Effect, которые относятся к одной и той же сущности эффекта, будут помечены как I-Effect.

Пример аннотированного датасета представлен на рис. 5.

```

{
  "sentence": "Economic growth has been known to encouraging better work-life balance.",
  "annotations": [
    "B-Cause",
    "I-Cause",
    "0",
    "0",
    "0",
    "0",
    "0",
    "0",
    "0",
    "B-Effect",
    "I-Effect",
    "I-Effect"
  ]
},

```

Рис. 5. Пример аннотированного датасета

В отличие от feature extraction, суть дообучения (Fine Tuning) заключается в размораживании последних слоев нейронной сети (Neural Net) и их обучении. Таким образом, корректируются слои, которые имеют наиболее абстрактные представления. Модель обучается распознавать паттерны в тексте, таких как синтаксические зависимости между словами, семантические роли и контекстные маркеры, которые указывают на причинно-следственные отношения. Для обучения модели используются следующие гиперпараметры настройки обучения:

- 1) evaluation_strategy="epoch";
- 2) learning_rate=5e-5;
- 3) per_device_train_batch_size=64;
- 4) num_train_epochs=3;
- 5) weight_decay=0.01;
- 6) from_pretrained("bert-base-uncased");
- 7) test_size=0.2.

Параметр `weight_decay=0.01` помогает предотвратить переобучение, добавляя штраф за сложность модели. Параметр `test_size=0.2` подразумевает, что 20% данных отводится для валидации. Разделение данных 80/20 выбрано для баланса между обучением и валидацией. Меньшая тестовая выборка (например, 10%) может не обеспечить репрезентативной оценки, а большая (например, 30%) – уменьшит объем данных для обучения. Размер батча 64 выбран для эффективного использования памяти GPU, этот размер обеспечивает оптимальную производительность на доступном оборудовании. Меньшие батчи (например, 16 или 32) увеличивают время обучения, а большие (например, 128) могут не поместиться в память GPU. Значение $5e-5$ выбрано как рекомендуемое для моделей на основе BERT. Более высокие значения (например, $1e-4$) могут привести к нестабильному обучению и потере предобученных параметров, а более низкие (например, $1e-5$) замедляют сходимость модели. Три эпохи выбраны как достаточное количество для сходимости модели. Большее число эпох (например, 5 или 10) может привести к переобучению, а меньшее (например, 1 или 2) – к недообучению.

Эксперимент. Для эксперимента мы использовали набор синтетических данных (датасет 1) для дообучения модели и набор синтетических данных (датасет 2) для тестирования модели.

Обучающий набор состоит из 1000 предложений и содержит 650 каузальных триплетов. В тестовом наборе содержится 1500 предложений, включая 700 каузальных триплетов.

Информация о синтетическом наборе данных для дообучения модели приведена в табл. 3.

Таблица 3

Статистика наборов данных

Подмножество	Размер подмножества
Training Set 80%	800
Training Set 60%	600
Training Set 40%	400
Test Set 20%	200
Test Set 10%	100

Эксперимент проводился на компьютере средней мощности, оснащенном процессором Intel Core i5 и 16 ГБ оперативной памяти, без видеокарты. Обучение модели на датасете размером 1000 примеров заняло примерно 4 часа.

Результаты и анализ. Проведенный эксперимент позволил получить результаты, которые позволяют оценить эффективность модели на подмножествах датасетов. Мы оцениваем наш алгоритм на синтетических обучающих и тестовых наборах данных для прогнозирования отношений, поскольку наш подход установлен как неконтролируемый. Основными показателями оценки работы модели являются уровень точности ACC (Accuracy), precision rate P (точность), recall rate R (полнота) и F1 value (F-score). Результаты эксперимента при дообучении и тестировании приведены в табл. 4 и 5, соответственно.

Таблица 4

Результаты дообучения модели (1000 предложений)

Подмножество	Размер подмножества	Accuracy	Precision rate P	Recall rate R	F1-score
Training Set 80%	800	0,94	0,89	0,94	0,92
Training Set 60%	600	0,94	0,89	0,94	0,92
Training Set 40%	400	0,94	0,89	0,94	0,92
Test Set 20%	200	0,95	0,90	0,95	0,92
Test Set 10%	100	0,95	0,90	0,95	0,92

Таблица 5

Результаты тестирования модели (1500 предложений)

Подмножество	Размер подмножества	Accuracy	Precision rate P	Recall rate R	F1-score
Test Set 80%	1200	0,95	0,94	0,95	0,94
Test Set 60%	900	0,95	0,94	0,95	0,95
Test Set 40%	600	0,95	0,94	0,95	0,95
Test Set 20%	300	0,96	0,94	0,96	0,95
Test Set 10%	150	0,96	0,94	0,96	0,95

Результат эксперимента показывает, что точность модели на подмножествах датасета 1 находится в пределах 0,89-0,90 (табл. 4), на подмножествах датасета 2 устанавливается на 0,94 (табл. 5). Сравнение результатов на подмножествах датасетов 1 и 2 показывает, что модель демонстрирует устойчивость точности датасета 2 уже на всех подмножествах. Это может быть объяснено тем, что формирование датасетов происходит по одному принципу.

В целом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что модель демонстрирует приемлемую точность на подмножествах датасетов, но ее эффективность зависит от размера и однородности подмножества. Это требует дальнейшего исследования и оптимизации модели для улучшения ее эффективности на различных типах данных.

Предлагаемая модель может быть использована на компьютере средней мощности, что является значительным преимуществом с точки зрения экономики и охраны окружающей среды.

Заключение. В этой работе представлена модель извлечения причинно-следственных связей из текста с явной причинностью, направленностью и полярностью. Данная постановка проблемы обусловлена особенностями применения результатов извлечения для графового представления ситуаций принятий решения в сложных социогуманитарных средах. В таких случаях извлекаемый кортеж *<фраза причины, фраза глагола, фраза следствия, полярность>* легко трансформируется в соответствующие элементы графа *<исходящий узел, направление связи, входящий узел, знак веса связи>*.

В этой статье мы формулируем уточнение извлечения причинности как проблему классификации, добавляя слой классификации в предобученную модель BERT поверх выходных данных трансформера для токена [CLS]. Этот новый слой *list of tuples* для дообучения формируется путем последовательной фильтрации на основе семантики каузального глагола.

Экспериментальные результаты показали приемлемую точность модели: F1-оценка для правильного установления причинно-следственной связи между сущностями составила 82%. Предложенная модель не требует использования мощных дата-центров или специализированных компьютеров, что делает ее более доступной и экологически чистой. Кроме того, это позволяет использовать модель на веб-сайте, доступном для некачественно обученных пользователей, без необходимости использования специализированного оборудования. Это показывает возможности применения модели в различных областях, таких как образование, здравоохранение и другие, где важна доступность и простота использования.

В дальнейших исследованиях планируется продолжить совершенствование модели извлечения каузальных связей между предложениями, в частности, сосредоточившись на улучшении точности выявления причинно-следственных отношений между предложениями с разными уровнями абстракции и сложности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00029, <https://rscf.ru/project/25-21-00029/> в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li Z. et al. Causality extraction based on self-attentive BiLSTM-CRF with transferred embeddings, *Neurocomputing*, 2021, Vol. 423, pp. 207-219.
2. Banko M., Etzioni O. The Tradeoffs Between Open and Traditional Relation Extraction, *Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 2008.
3. Shao Y. et al. Extraction of causal relations based on SBEL and BERT model, *Database*, 2021, Vol. 2021.
4. Zhao X. et al. A Comprehensive Survey on Relation Extraction: Recent Advances and New Frontiers, 2023.
5. Bojduj B.N. Extraction of Causal-Association Networks from Unstructured Text Data. San Luis Obispo, California: California Polytechnic State University, 2009, 61 p.
6. Alibage A. Achieving High Reliability Organizations Using Fuzzy Cognitive Maps - the Case of Offshore Oil and Gas. Portland, OR: Portland State University, 2020, 342 p.
7. An N. et al. Extracting causal relations from the literature with word vector mapping, *Comput. Biol. Med.*, 2019, Vol. 115, pp. 103524.
8. Devlin J. et al. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding, 2018.
9. Paulheim H. Knowledge graph refinement: A survey of approaches and evaluation methods, *Semant. Web*, ed. Cimiano P., 2016, Vol. 8, No. 3, pp. 489-508.
10. Kulikowski C.A., Weiss S.M. Representation of Expert Knowledge for Consultation: The CASNET and EXPERT Projects, *Artificial Intelligence in Medicine*. Routledge, 2019, pp. 21-55.
11. Kosko B. Hidden patterns in combined and adaptive knowledge networks, *Int. J. Approx. Reason*, 1988, Vol. 2, No. 4, pp. 377-393.
12. Yang J., Han S.C., Poon J. A survey on extraction of causal relations from natural language text, *Knowl. Inf. Syst.*, 2022, Vol. 64, No. 5, pp. 1161-1186.
13. Park J., Cardie C. Identifying Appropriate Support for Propositions in Online User Comments, *Proceedings of the First Workshop on Argumentation Mining*. Stroudsburg, PA, USA: Association for Computational Linguistics, 2014, pp. 29-38.
14. Job S. et al. Exploring Causal Learning through Graph Neural Networks: An In-depth Review, 2023.
15. Li Z. et al. CausalBERT: Injecting Causal Knowledge Into Pre-trained Models with Minimal Supervision, *ArXiv*. 2021, Vol. abs/2107.0.
16. Felgueira T. et al. The Impact of Feature Causality on Normal Behaviour Models for SCADA-based Wind Turbine Fault Detection, 2019.
17. Tselykh A., Vasilev V., Tselykh L. A Method for Modeling the Control Impact Strategy Based on the Mental Frame of References of the Decision-Maker, 2023, pp. 315-324.
18. Tselykh A. et al. Influence control method on directed weighted signed graphs with deterministic causality, *Ann. Oper. Res.*, 2022, Vol. 311, No. 2, pp. 1281-1305.
19. Tselykh A., Vasilev V., Tselykh L. Assessment of influence productivity in cognitive models, *Artif. Intell. Rev.*, 2020.
20. Fellbaum C. WordNet / ed. Fellbaum C. The MIT Press, 1998.
21. Vasiliev Y. Natural language processing with Python and spaCy: A practical introduction. No Starch Press, 2020.
22. Schmitt X. et al. A Replicable Comparison Study of NER Software: StanfordNLP, NLTK, OpenNLP, SpaCy, Gate, 2019 *Sixth International Conference on Social Networks Analysis, Management and Security (SNAMS)*. IEEE, 2019, pp. 338-343.

Целых Александр Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: ant@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185562047; кафедра ИАСБ; д.т.н.; профессор.

Валухов Игорь Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: valuhov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79515263364; кафедра ИАСБ; магистрант.

Целых Лариса Анатольевна – Южный федеральный университет; e-mail: l.tselykh58@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185562047; кафедра ИАСБ; к.э.н.; доцент.

Tselykh Alexander Nikolayevich – Southern Federal University; e-mail: ant@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185562047; the department IASB; dr. of eng. sc.; professor.

Valukhov Igor Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: valuhov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79515263364; the department IASB; postgraduate student.

Tselykh Larisa Anatolievna – Southern Federal University; e-mail: l.tselykh58@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79185562047; the department IASB; dr. of eng. sc.; senior lecturer.

М.С. Анферова, А.М. Белевцев, В.В. Дворецкий

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ

Стремительный рост научных знаний и постоянно растущий объем научных публикаций создают серьезные проблемы для выявления новых тенденций и понимания меняющегося исследовательского ландшафта. Формирование технологических трендов необходимо для разработки и построения дорожных карт развития на национальном, отраслевом и корпоративном уровнях. Задача определения технологических трендов является важной проблемой в области анализа данных и машинного обучения. Известные методы анализа, включающие кластеризацию по временному фактору, позволяют сформировать ключевые фразы, но задача формирования трендов, исследования их характеристик и динамики их развития не имеют в настоящее время удовлетворительного решения. Решение этой задачи предполагает: – создание методики перехода от ключевых фраз к непосредственно названию новых технологических трендов; – определение закономерности, развития технологий в заданной предметной области; – определение направления развития будущих исследований. Решение этих задач позволит создать эффективный инструмент поддержки принятия решений, уменьшить время выявления тренда, оценки динамики его развития и построения дорожных карт. В представленной работе предлагается новый подход к формированию технологических трендов. Метод основан на алгоритмах машинного обучения и методах обработки естественного языка и направлен на преодоление некоторых ограничений традиционных методов. В частности, методика позволяет выявить сложные взаимосвязи между различными научными концепциями и обеспечивает более точный и всесторонний способ выявления трендов. Проведен анализ методов и способов выявления трендов научно-технологического развития и их развития на основе ключевых слов, выявленных с помощью модели, использующей кластеризацию по времени. Предложен алгоритм выявления трендов.

Мониторинг; анализ текста; обнаружение тренда; экспоненциальный рост; технологическое развитие; прогнозирование трендов.

M.S. Anferova, A.M. Belevtsev, V.V. Dvoreckij

METHODOLOGY FOR DETERMINING AND ANALYZING THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF TECHNOLOGICAL TRENDS

The rapid growth of scientific knowledge and the ever-increasing volume of scientific publications pose serious challenges to identify new trends and understand the changing research landscape. The formation of technological trends is necessary for the development and construction of development roadmaps at the national, sectoral and corporate levels. The task of identifying technological trends is an important problem in the field of data analysis and machine learning. Well-known methods of analysis, including clustering by time factor, make it possible to form key phrases, but the task of forming trends, studying their characteristics and dynamics of their development does not currently have a satisfactory solution. The solution to this problem involves: – creating a methodology for moving from key phrases to directly naming new technological trends; – determination of the regularity of technology development in a given subject area; – determining the direction of future research. Solving these tasks will create an effective decision support tool, reduce the time to identify a trend, assess the dynamics of its development and build roadmaps. In the presented work, a new approach to the formation of technological trends is proposed. The method is based on machine learning algorithms and natural language processing methods and aims to overcome some of the limitations of traditional methods. In particular, the technique makes it possible to identify complex relationships between various scientific concepts and provides a more accurate and comprehensive way to identify trends. The analysis of methods and methods for identifying trends in scientific and technological development and their development based on keywords identified using a model using time clustering is carried out. An algorithm for identifying trends is proposed.

Monitoring; text analysis; trend detection; exponential growth; technological development; trend forecasting.

Введение. В настоящее время можно наблюдать стремительное развитие науки и технологий - постоянно появляются новые открытия и инновации. Данный прогресс приводит к значительным изменениям в обществе, создавая как новые возможности, так и проблемы для исследователей, предпринимателей и лиц, принимающих решения [1].

Необходимо постоянно отслеживать появление тенденций и развитие технологических и технических решений науки и техники в заданных предметных областях [2, 3].

С постоянным увеличением объема публикуемых научных работ становится все труднее выявлять новые тенденции и результаты научных исследований и разработок [4, 5].

В этой связи растет потребность в более эффективных методах выявления новых тенденций в глобальном информационном пространстве [6, 7].

В работах [8, 9] был разработан алгоритм с кластеризацией с временным смещением позволяющий сформировать первичное название тренда. Данные ключевые слова интерпретируются аналитиком и могут быть утверждены в качестве тренда [10]. Обработка первичной коллекции трендов аналитиком может привести к замедлению прогресса в исследованиях.

В данной работе представлена методика, которая позволяет:

- ◆ более точно, по сравнению с существующими алгоритмами, выделить первичные наименования технологических трендов на более раннем этапе;
- ◆ наблюдать за их трансформацией и изменением их характеристик с течением времени.

Это позволит сократить время формирования конечных трендов аналитиком.

Основная часть. Алгоритм формирования технологических трендов [10] включал в себя метод кластеризации с временным смещением [9], направленный на повышение эффективности обнаружения за счет уменьшения сходства документов на основе временного интервала между документами.

Предложенный алгоритм [11] помогает выделять тренды, но результатом его действия является, по сути, набор некоторых ключевых слов, которые формировались путем подсчета количества упоминаний. Чем больше какая-то ключевая фраза встречалась во всем наборе текстов, тем вероятнее, что она является трендом в этих данных. На основе анализа данных ключевых слов аналитик формирует итоговые технологические тренды.

К недостаткам данного метода следует отнести наличие следующих неопределенностей:

1. Начиная с какого количества вхождений считать, что фраза тренд?
2. Каким образом вести учет роста упоминаний в процентном или количественном соотношении? Найти первоисточник
3. Как быть с выделенными ключевыми фразами общего назначения, такими как, например, “обучающие данные” и “нейросети”?

Предложенный алгоритм в данной работе алгоритм должен обеспечить раскрытие этих неопределенностей, более точно формировать тренды и сократить выборку, что в свою очередь ускорит работу аналитика.

Для достижения поставленных целей в предлагаемом алгоритме необходимо реализовать следующие функции:

Ф1. Создание словаря с фразами общей лексики и фразами, которые модель не будет считать трендом.

Ф2. Группировка идентичных ключевых фраз в одно общее выражение. Данная функция позволит избежать синонимов в конечной выборке.

Ф3. Необходимо ввести и учитывать понятие веса документов.

Для реализации описанных функций необходимо сократить количество первичных ключевых фраз и повысить точность их выявления.

Введем в алгоритм возможность аналитиком настраивать параметры модели. Ввод дополнительных параметров позволит указывать какую конкретно информацию считать трендом уже на начальном этапе анализа.

Нужно подсчитать сколько раз ключевая фраза упоминается в конкретном документе. На основании полученной информации пользователь может сделать выбор нужно ли в конкретной ситуации учитывать информацию из документов, где ключевая фраза повторяется, условно, 50 раз с документом, в котором она повторяется 2 раза [12].

В зависимости от обстоятельств аналитик может принять решение уменьшить вес документа на определенное значение.

При этом алгоритм должен определять не только сам тренд, но и информационные первоисточники (статьи, материалы конференций и т.д.).

Необходимо знать, когда определенная технология начинает появляться и когда она становится значимой для оценки с использованием статистических параметров, таких как «интенсивность», «степень технологической готовности», «научная продуктивность», а также создание, распространение и применение технологических решений, наряду с производством технологической продукции и услуг [13].

На рис. 1 представлены этапы формирования новой технологии.

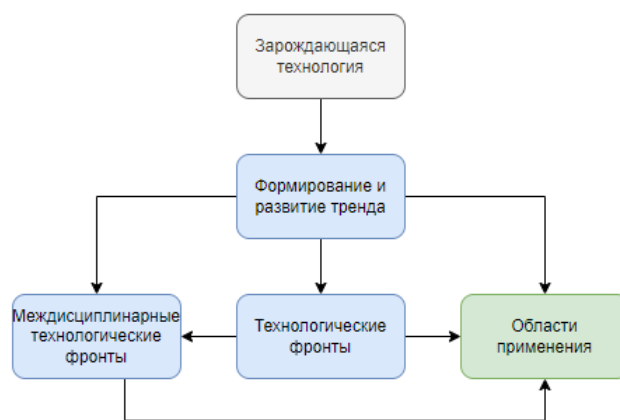


Рис. 1. Траектории развития технологий

Можно выделить три основных признака, с которых начинается формирование тренда (рис. 2):

1. Начальное упоминание ключевого слова. Тренд считается инициированным статьей, где впервые встречается соответствующее тренду ключевое слово [14].

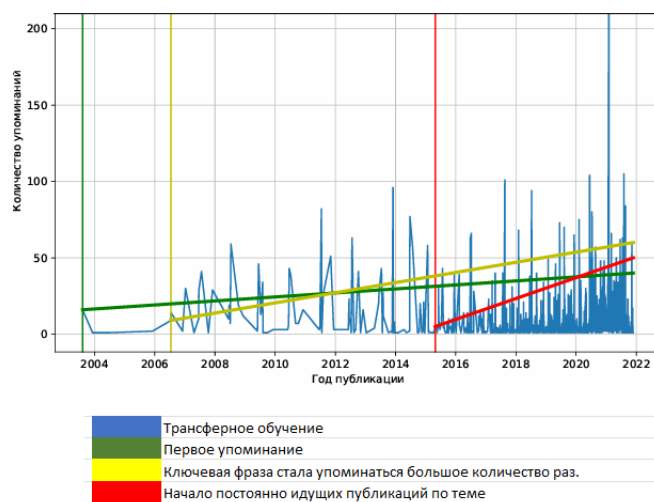


Рис. 2. Зарождение тренда Трансферное обучение с течением времени

2. Ключевое слово начинает активно использоваться и упоминаться в большом количестве источников.

3. Постоянное появление публикаций с данным ключевым словом.

В дальнейшем тренды могут достигать стадии стабилизации или плато [15]. При этом продолжается появляться информация, но основные характеристики тренда не меняются и существенного прорыва не предвидится.

Введем следующие обозначения:

V – словарь общей лексики и стоп фраз.

α – параметр, отвечающий за то, сколько раз должна встретиться ключевая фраза во всем корпусе документов, чтоб она считалась трендом.

Если параметр $\alpha = 0$, то алгоритм будет формировать ключевые слова не смотря на количество упоминаний.

d – отвечающий за контролируемость начала экспоненциального роста. отвечает на вопрос о том, как сильно должно вырасти количество публикаций с упоминанием тренда, чтобы это можно было считать началом экспоненциального роста [16].

Тогда, для текущего временного интервала слово добавляется в коллекцию если оно удовлетворяет условию:

$$\frac{t \int new - t \int old}{t \int old} > \alpha, \quad (1)$$

где $t \int old$ – количество встречаемости слова в документах в предыдущем временном интервале; $t \int new$ – количество встречаемости слова в документах в текущем временном интервале.

Тогда количество тем определяется следующим образом:

$$T = T_{start} + \frac{V}{\beta}, \quad (2)$$

где T – исходный набор тем; T_{start} – определяет количество тем в начальном временном этапе; β ограничивает количество добавляемых тем.

После этапа сбора статистики и фильтрации ключевых фраз имеется набор определенных трендов, которые можно выдать конечному пользователю.

По каждому тренду так же предоставляется возможность посмотреть документ-первоисточник, что позволит проанализировать изменения характеристик тренда с течением времени.

Алгоритм должен обеспечивать реализацию следующих функций:

1. Пропуск каждого документа, хранящихся в базе данных [17] через модель выделения ключевых фраз [18].

2. Подсчет количество упоминаний по каждой из ключевых фраз.

3. Фильтрация множество ключевых фраз сравнивая их со словарем V .

4. Формирование трендов.

5. Определение документа-первоисточника тренда.

Предлагаемый алгоритм формирования научно-технологических трендов можно представить в следующем виде (рис. 3).

В качестве итогового результата аналитику предоставляется сформированные технологические тренды. Так же есть возможность посмотреть промежуточные коллекции в случаи необходимости.

На основании результатов алгоритма определения опорных тем можно создать сводную информационную таблицу (табл. 1) с колонками "Тренд" "файл", "первоисточник", "ключевые слова", где в колонке:

- ♦ "тренд" – тема, определенная LDA [19];
- ♦ "файл" – хранится ссылка на файл, определенная TF-IDF [20];
- ♦ "первоисточник" – хранится ссылка на файл первоисточник;
- ♦ "ключевые слова" – сохранение остальных ключевых слов, по которым был сформирован тренд.

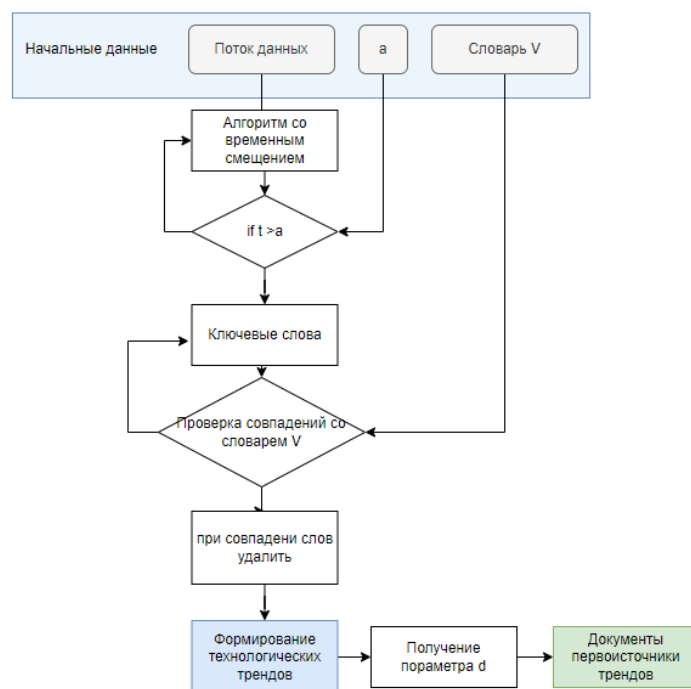


Рис. 3. Алгоритм выявления трендов

Таблица 1

Сводная информационная таблица

№	Тренд	Файл	Первоисточник	Ключевые слова
1.	Технологии ИИ	Document 1 Document 2 ...	Document 2	Моделирование ситуаций Распознавание образов Обобщение данных ...
2.	Кибербезопасность	Document 2 Document 6 ...	Document 6	Биометрия Транспарентные вычисления Защита ...
3.	Кибероружие	Document 3 Document 6 Document 7 ...	Document 7	Кибератака Кибервойна Самоуничтожение ...
4.	...			...

Имея такую таблицу, будет легко модифицировать ее в будущем (если мы будем изучать модель с нуля), но также относительно легко подключить ее к существующей базе данных.

Используя данную таблицу, облегчается поиск конкретных документов и документа-первоисточника тренда. Достаточно выбрать определенные ключевые слова из таблицы, и мы сразу получаем доступ к заданным файлам (столбец файл).

Данный алгоритм обладает существенными преимуществами, так как позволяет настраивать результат сформированных трендов под конкретный индивидуальный запрос.

Заключение. Задача осуществления постоянного мирового мониторинга научно-технологических областей, технологических преобразований и тенденций их развития становится все более актуальной и требует разработки новых методов анализа и обработки информации.

Предложенная методика определения и анализа технических характеристик технологических трендов основывается на алгоритмах интеллектуальных сервисов для поиска и мониторинга информации в специализированных базах данных.

В основе данной методики – алгоритм с использованием временного смещения, который, согласно проведенным экспериментам, демонстрирует лучшие результаты по сравнению с традиционными методами кластеризации данных.

Разработанная методика позволяет настраивать процесс выделения трендов в алгоритме с помощью дополнительного словаря и редактируемых параметров.

В результате работы алгоритма будут выявлены тренды из документов, находящихся в базе данных, а также определен документ – первоисточник тренда.

Используя предлагаемый подход можно получить более точные результаты в формировании трендов, уменьшить время выполнения запроса в три раза и исключить влияние субъективных оценок аналитиков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Белевцев А.М., Дворецкий В.В.* Методы мониторинга конкурентного окружения высокотехнологичного предприятия // *Наукоемкие технологии.* – 2019. – Т. 20, № 3. – С. 17-23.
2. *Анферова М.С., Белевцев А.М., Дворецкий В.В.* Методика и структурно-функциональная организация системы мониторинга научно-технической информации для определения направлений развития высокотехнологичных предприятий // *Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «КомТех-2024».* – С. 302-309.
3. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Поисковые роботы для автоматизированного мониторинга информации в сетях общего и специального назначения // *18-я Международная научно-практическая конференция «Управление качеством».* – 2019.
4. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Общая концепция создания технологии интеллектуального поиска информации в сетях общего и специального назначения // *XXV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко “Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении” «КомТех-2021».*
5. *Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Белевцев А.А.* Методика оценки времени и стоимости реализации технологических трендов в условиях неопределенности и не полноты информации // *Наукоемкие технологии.* – 2019. – № 5.
6. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Анализ направлений создания алгоритмов эффективного поиска информации в сетях общего и специального назначения // *Матер. III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства».* – Рязань: РГРТУ, 2018.
7. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Анализ направлений развития технологий мониторинга в условиях большого объема неструктурированной информации // *XXIV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко “Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении” «КомТех-2020».*
8. *Анферова М.С., Белевцев А.М., Белевцев А.А.* Методика формирования технологических трендов на основе обработки разнородных данных в сетях общего назначения // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2024.
9. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Анализ требований и разработка алгоритмов интеллектуальных сервисов мониторинга // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2022. – № 3. – С. 119-129.
10. *Анферова М.С., Белевцев А.М., Белевцев А.А.* Методика анализа развития зарождающихся технологий и технологических фронтов // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2023. – № 4. – С. 87-96.
11. *Sakshi Patel, Shivani Sihmar, Aman Jatain.* A study of hierarchical clustering algorithms // *2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom).* – 2015. – P. 537-541.
12. *Pilehvar Mohammad Taher.* WiC: the Word-in-Context Dataset for Evaluating Context Sensitive Meaning Representations. – 2019.
13. *Deng Z., Liu R., Xu P., Choi K., Zhang W., Tian X., Zhang T., Liang L., Qin B., Wang S.* Multi-view clustering with the cooperation of visible and hidden views // *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* – 2020.
14. *Белевцев А.А., Белевцев А.М., Балыбердин В.А.* Методика анализа и оценки приоритетов технологических трендов и технологий // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2022. – № 6.

15. *Tomas Mikolov et al.* Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space // International Conference on Learning Representations. – 2013.
16. *Белевцев А.М., Садреев Ф.Г., Белевцев А.А., Батыбердин В.А.* Разработка интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // Наукоемкие технологии. – 2019. – Т. 20, № 3. – С. 24-29.
17. *Анферова М.С., Белевцев А.М.* Разработка алгоритма определения опорных тем для решения задач стратегического анализа // Сб. докладов: Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» «КомТех- 2022». – 2022. – С. 132-138.
18. *Devlin Jacob.* BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. – 2019.
19. *Radford Alec., Karthik Narasimhan.* Improving Language Understanding by Generative Pre-Training. – 2018.
20. *Sahar Behpour et al.* Automatic trend detection: Time-biased document clustering // Knowledge-Based Systems. – 2021. – 220.

REFERENCES

1. *Belevtsev A.M., Dvoretzkiy V.V.* Metody monitoringa konkurentnogo okruzheniya vysokotekhnologichnogo predpriyatiya [Methods for monitoring the competitive environment of a high-tech enterprise], *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, Vol. 20, No. 3, pp. 17-23.
2. *Anferova M.S., Belevtsev A.M., Dvoretzkiy V.V.* Metodika i strukturno-funktsional'naya organizatsiya sistemy monitoringa nauchno-tekhnicheskoy informatsii dlya opredeleniya napravleniy razvitiya vysokotekhnologichnykh predpriyatiy [Methodology and structural and functional organization of the system for monitoring scientific and technical information to determine the development directions of high-tech enterprises], *Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «KomTekh-2024»* [Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation "ComTech-2024"], pp. 302-309.
3. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Poiskovye roboty dlya avtomatizirovannogo monitoringa informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [Search robots for automated monitoring of information in general-purpose and special-purpose networks], *18-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Upravlenie kachestvom»* [18th International Scientific and Practical Conference "Quality Management"], 2019.
4. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Obshchaya kontseptsiya sozdaniya tekhnologii intellektual'nogo poiska informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [General concept of creating a technology for intelligent information search in general-purpose and special-purpose networks], *XXV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. Pyavchenko "Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii" «KomTekh-2021»* [XXV All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation named after Professor O.N. Pyavchenko "Computer and Information Technologies in Science, Engineering and Management" "ComTech-2021"].
5. *Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Belevtsev A.A.* Metodika otsenki vremeni i stoimosti realizatsii tekhnologicheskikh trendov v usloviyakh neopredelennosti i ne polnoty informatsii [Methodology for assessing the time and cost of implementing technological trends in conditions of uncertainty and incomplete information], *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, No. 5.
6. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Analiz napravleniy sozdaniya algoritmov effektivnogo poiska informatsii v setyakh obshchego i spetsial'nogo naznacheniya [Analysis of directions for creating algorithms for efficient information retrieval in general-purpose and special-purpose networks], *Mater. III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy sovremennoy nauki i proizvodstva»* [Proceedings of the III All-Russian scientific and technical conference "Actual problems of modern science and production"], Ryazan': RGRTU, 2018.
7. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Analiz napravleniy razvitiya tekhnologiy monitoringa v usloviyakh bol'shogo ob'ema nestrukturirovannoy informatsii [Analysis of development directions of monitoring technologies in the context of large volumes of unstructured information], *XXIV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. Pyavchenko "Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii" «KomTekh-2020»* [XXIV All-Russian scientific and technical conference with international participation named after Professor O.N. Pyavchenko "Computer and information technologies in science, engineering and management" "KomTech-2020"].
8. *Anferova M.S., Belevtsev A.M., Belevtsev A.A.* Metodika formirovaniya tekhnologicheskikh trendov na osnove obrabotki raznorodnykh dannykh v setyakh obshchego naznacheniya [Methodology for the formation of technological trends based on the processing of heterogeneous data in general-purpose networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024.

9. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Analiz trebovaniy i razrabotka algoritmov intellektual'nykh servisov monitoringa [Analysis of requirements and development of algorithms for intelligent monitoring services], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 3, pp. 119-129.
10. *Anferova M.S., Belevtsev A.M., Belevtsev A.A.* Metodika analiza razvitiya zarozhdayushchikhsya tekhnologiy i tekhnologicheskikh frontov [Methodology for analyzing the development of emerging technologies and technological fronts], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 4, pp. 87-96.
11. *Sakshi Patel, Shivani Sihmar, Aman Jatain.* A study of hierarchical clustering algorithms, *2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, 2015, pp. 537-541.
12. *Pilehvar Mohammad Taher.* WiC: the Word-in-Context Dataset for Evaluating Context Sensitive Meaning Representations, 2019.
13. *Deng Z., Liu R., Xu P., Choi K., Zhang W., Tian X., Zhang T., Liang L., Qin B., Wang S.* Multi-view clustering with the cooperation of visible and hidden views, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 2020.
14. *Belevtsev A.A., Belevtsev A.M., Balyberdin V.A.* Metodika analiza i otsenki prioriteto tekhnologicheskikh trendov i tekhnologiy [Methodology for analysis and assessment of priorities of technological trends and technologies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 6.
15. *Tomas Mikolov et al.* Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space, *International Conference on Learning Representations*, 2013.
16. *Belevtsev A.M., Sadreev F.G., Belevtsev A.A., Balyberdin V.A.* Razrabotka intellektual'nykh servisov monitoringa tekhnologicheskikh trendov v informatsionno-analiticheskikh kompleksakh [Development of intelligent services for monitoring technological trends in information and analytical complexes], *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2019, Vol. 20, No. 3, pp. 24-29.
17. *Anferova M.S., Belevtsev A.M.* Razrabotka algoritma opredeleniya opornykh tem dlya resheniya zadach strategicheskogo analiza [Development of an algorithm for determining support topics for solving strategic analysis problems], *Sb. dokladov: Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii» «KOMTEKh- 2022»* [Collection of reports: Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation "Computer and information technologies in science, engineering and management" "KomTech-2022"], 2022, pp. 132-138.
18. *Devlin Jacob.* BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. 2019.
19. *Radford Alec., Karthik Narasimhan.* Improving Language Understanding by Generative Pre-Training. 2018.
20. *Sahar Behpour et al.* Automatic trend detection: Time-biased document clustering, *Knowledge-Based Systems*, 2021, 220.

Анферова Маргарита Сергеевна – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: gludkina@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79055220749; старший преподаватель.

Белевцев Андрей Михайлович – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

Дворецкий Виктор Васильевич – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: v.dworetsky@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79265201418; старший преподаватель.

Anferova Margarita Sergeevna – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: gludkina@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79055220749; senior lecturer.

Belevtsev Andrey Michailovitch – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

Dvoretzkiy Victor Vasilyevich – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: v.dworetsky@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79265201418; senior lecturer.

А.А. Богнюков, Д.Ю. Зорькин, И.А. Тарасова

МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИИ: СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В данной статье подробно раскрывается применение метода анализа иерархий (МАИ) для оценки инвестиционных альтернатив в условиях динамичных рыночных изменений. Методология МАИ позволяет структурировать сложные многокритериальные задачи, разделяя их на иерархические уровни, а затем постепенно объединяя результаты, чтобы принять оптимальное решение. Особое внимание в данной статье уделено на то, что МАИ способствует снижению субъективности при оценке множества факторов, связанных с инвестициями, поскольку конечные выводы базируются на количественных показателях и проверке согласованности суждений. Для демонстрации преимуществ данного подхода в статье приводится сравнительный анализ трёх компаний: Apple Inc., ПАО «Сеgezha Групп» и ПАО «Аэрофлот». Критерии, по которым проводится оценка, включают динамику стоимости акций, дивидендную доходность, рыночную капитализацию, коэффициент осцилляции и влияние отраслевой специфики на перспективы развития. Apple Inc. выделяется прежде всего высокой рыночной капитализацией и стабильными дивидендными выплатами, тогда как ПАО «Сеgezha Групп» и ПАО «Аэрофлот» имеют собственные сильные стороны, такие как потенциал роста в определённых сегментах рынка и ориентация на перспективные отрасли. Тем не менее итоговые результаты многокритериального анализа показывают, что в совокупности Apple Inc. занимает лидирующие позиции по большинству ключевых показателей. Следует отметить, что важность метода анализа иерархий выходит далеко за рамки академических исследований. На практике данный метод широко используется в корпоративном секторе для оценки риска, формирования инвестиционного портфеля и выбора стратегических приоритетов. Его гибкость обеспечивает универсальное применение как для крупных международных корпораций, так и для локальных предприятий, стремящихся объективно сопоставить альтернативы. Также в статье акцентируется внимание на важности тщательного сбора и систематизации исходных данных. Ошибки или неточности на этом этапе могут существенно исказить итоговые выводы, что особенно критично при принятии инвестиционных решений. Проверка отношения однородности в МАИ даёт возможность вовремя выявить противоречивые оценки и скорректировать матрицы попарных сравнений. Таким образом, авторы демонстрируют, что метод анализа иерархий представляет собой надёжный инструмент для объективной и прозрачной оценки инвестиционных проектов. Благодаря учёту целого спектра количественных и качественных характеристик, МАИ позволяет сформировать взвешенные рекомендации относительно того, какие активы и компании могут принести максимальную отдачу при разумном уровне риска.

Теория принятия решений; МАИ; инвестиционная привлекательность; динамика акций; дивидендная доходность; рыночная капитализация; коэффициенты.

A.A. Bognyukov, D.Yu. Zorkin, I.A. Tarasova

HIERARCHY ANALYSIS METHOD: A SYSTEMATIC APPROACH TO DECISION MAKING UNDER UNCERTAINTY

This article provides a detailed examination of the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) for evaluating investment alternatives under dynamic market conditions. The AHP methodology enables the structuring of complex multi-criteria tasks by dividing them into hierarchical levels and then progressively synthesizing the results to reach an optimal decision. Special emphasis is placed on how AHP reduces subjectivity when assessing numerous investment-related factors, as the final conclusions are based on quantitative indicators and a consistency check of expert judgments. To illustrate the advantages of this approach, the article presents a comparative analysis of three companies: Apple Inc., PAO "Segezha Group," and PAO "Aeroflot." The evaluation criteria include stock price dynamics, dividend yield, market capitalization, volatility (oscillation coefficient), and the influence of industry specifics on growth prospects. Apple Inc. stands out primarily due to its high market capitalization and stable dividend payouts, whereas PAO "Segezha Group" and PAO "Aeroflot" each have their own strengths, such as growth potential in specific market segments and a focus on promising industries. Nevertheless, the final results of the multi-criteria analysis indicate that Apple Inc. leads in most of the key metrics overall. It should be noted that the significance of AHP extends well beyond academic research. In practice, this method is widely used in the corporate sector for risk assessment, investment portfolio formation, and the selection of strategic priorities. Its flexibility ensures universal applicability both for large multinational corporations and for local enterprises that aim to objectively compare alternatives. The article also high-

lights the importance of careful data collection and systematization. Errors or inaccuracies at this stage can significantly distort the final conclusions, which is particularly critical in making investment decisions. The consistency check within AHP makes it possible to promptly identify conflicting evaluations and adjust the pairwise comparison matrices. Thus, the authors demonstrate that the Analytic Hierarchy Process is a reliable tool for the objective and transparent evaluation of investment projects. By considering a wide range of quantitative and qualitative characteristics, AHP enables the development of balanced recommendations regarding which assets and companies can deliver the highest returns at a reasonable level of risk.

Decision-making theory; AHP; investment attractiveness; stock dynamics; dividend yield; market capitalization; volatility.

Введение. Данная работа посвящена применению метода анализа иерархий (МАИ). Актуальность обусловлена необходимостью принимать обоснованные решения в условиях высокой конкуренции, учитывая множество факторов и рисков. МАИ обеспечивает системный подход к сравнению инвестиций, таких как динамика акций, дивидендная доходность, рыночная капитализация и волатильность, что позволяет учитывать все существенные аспекты для достижения лучших инвестиционных результатов. Цель работы – показать, как использование МАИ в совокупности с финансовыми показателями способствует эффективному инвестированию и помогает принимать более обоснованные и взвешенные решения в условиях неопределённости.

Данная работа посвящена применению метода анализа иерархий (МАИ). Актуальность исследования обусловлена необходимостью принимать обоснованные решения в условиях высокой конкуренции, когда требуется учитывать множество факторов и рисков. Метод анализа иерархий обеспечивает системный подход к сравнению инвестиционных альтернатив, позволяя оценивать такие параметры, как динамика акций, дивидендная доходность, рыночная капитализация и волатильность. Цель работы – показать, как применение МАИ способствует объективной оценке инвестиций и позволяет выявить наилучшую альтернативу в сложных экономических условиях.

Постановка задачи. Постановка задачи для данной статьи заключается в следующем:

- ♦ проведение анализа компаний с точки зрения инвестиционной привлекательности на основе ключевых критериев, включая динамику акций, дивидендную доходность, отрасль, рыночную капитализацию и волатильность;
- ♦ применение метода анализа иерархий для обоснованного выбора наилучшей альтернативы;
- ♦ сопоставить результаты расчётов, выявив сильные и слабые стороны каждой из компаний, чтобы сделать выводы об их инвестиционном потенциале.

Объект исследования: компании, рассматриваемые для долгосрочного инвестирования.

Предмет исследования: метод анализа иерархий как инструмент для принятия инвестиционных решений.

Исследование базируется на практическом применении теоретических методов принятия решений. Работа направлена на разработку эффективных решений, что подтверждает её актуальность и практическую значимость.

Материалы и методы. Для начала следует рассмотреть иерархию для выбора наилучшего варианта инвестирования:



Рис. 1. Иерархия для выбора наилучшего варианта инвестирования

Иерархия предназначена для выбора наилучшего варианта инвестирования и включает три уровня. На верхнем уровне расположена главная цель – определение оптимальной инвестиционной альтернативы. На среднем уровне выделены два ключевых критерия, определяющих инвестиционную привлекательность: потенциальная доходность, которая отражает ожидаемую выгоду от инвестиций, и надёжность, характеризующая устойчивость компании и минимизацию рисков. На нижнем уровне каждый из основных критериев делится на подкритерии. Для потенциальной доходности выделяются такие параметры, как динамика за год, %* (темпы изменения стоимости акций компании), дивидендная доходность, %* (стабильность и размер дивидендных выплат), и отрасль* (влияние отраслевой принадлежности компании на её долгосрочные перспективы). Для надёжности учитываются рыночная капитализация, млрд \$* (объём рынка компании как индикатор её стабильности), и коэффициент осцилляции, %* (уровень волатильности акций компании).

Краткий анализ компаний.

Apple Inc. – американская корпорация, основанная в 1976 году Стивом Джобсом, Стивом Возняком и Рональдом Уэйном. Первые продукты Apple I и Apple II способствовали популяризации персональных компьютеров, а выход Macintosh в 1984 году стал прорывом благодаря графическому интерфейсу. Возвращение Стива Джобса в 1997 году ознаменовало череду инноваций: компания представила iPod (2001), iTunes Store (2003), iPhone (2007) и iPad (2010), расширив линейку за пределы ПК и обеспечив себе позицию лидера в сфере потребительской электроники.

ПАО «Сегежа Групп» – крупный российский лесопромышленный холдинг АФК «Система», занимающийся полным циклом лесозаготовки и переработки древесины. В 2014 году были приобретены и консолидированы активы Сегежского ЦБК и ООО «Деревообработка – Проект»; в 2015-м компания получила название Segezha Group и в 2016-м расширила присутствие в Красноярском крае, купив Лесосибирский ЛДК №1. Акции холдинга размещены на Московской бирже с 2021 года, а продукция экспортируется более чем в 100 стран. Ключевые направления – производство бумаги, упаковки, пиломатериалов, фанеры, CLT-панелей и биотоплива при активных инвестициях в экологические технологии.

ПАО «Аэрофлот» – крупнейшая российская авиакомпания, основанная в 1923 году и одна из старейших в мире. После распада СССР в 1992 году она преобразовалась в акционерное общество, а в 2000 году прошла ребрендинг, получив нынешнее название. Предоставляя пассажирские и грузовые перевозки на внутренних и международных линиях, «Аэрофлот» также занимается техническим обслуживанием самолетов и подготовкой авиаперсонала. Флот включает лайнеры Airbus, Boeing и Sukhoi Superjet 100, а инновационные решения компании нацелены на повышение безопасности и качества обслуживания.

Метод анализа иерархии. Проведем расчет динамики за год на основании данных из сети Интернет.

Динамика за год – это темп роста, определяющийся делением текущего значения цены акции на значение год назад.

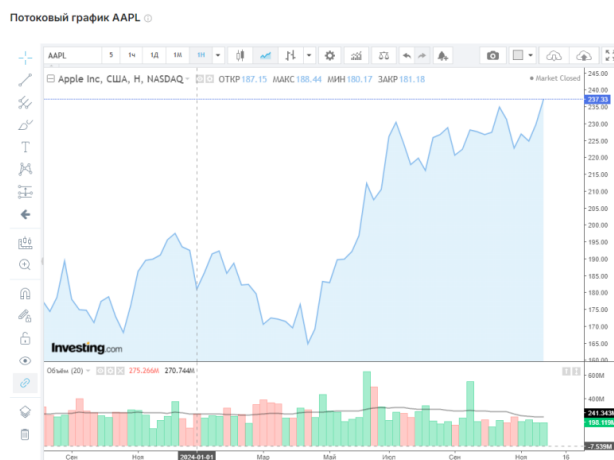


Рис. 2. Цены акций Apple Inc на начало 2024 года [1]

На основе графика видно, что стоимость акций Apple Inc. по состоянию на 1 января 2024 года составила 181,18 доллара США.



Рис. 3. Цены акций Apple Inc на начало 2023 года [1]

Согласно представленным данным, стоимость акций компании на 2 января 2023 года составляла 129,62 доллара США.

Следовательно, динамика за 2023 год у компании Apple Inc:

$$\frac{181,18}{129,62} \times 100\% = 139,78\%.$$

Для компании ПАО «Сегежа Групп»:



Рис. 4. Цены акций ПАО «Сегежа Групп» на начало 2024 года [2]

Согласно данным, цена одной акции ПАО «Сегежа Групп» на 1 января 2024 года составила 4,178 рубля.



Рис. 5. Цены акций ПАО «Сегежа Групп» на начало 2023 года [2]

По состоянию на начало 2023 года стоимость акции составляла 4,949 рубля. Следовательно, динамика за 2023 год у компании ПАО «Сегежа Групп»:

$$\frac{4,178}{4,949} \times 100\% = 84,42\%$$

Потоковый график AFLT



Рис. 6. Цены акций ПАО «Аэрофлот» на начало 2024 года [3]

Из представленного графика следует, что стоимость акций ПАО «Аэрофлот» на 1 января 2024 года составила 38,83 рубля.



Рис. 7. Цены акций ПАО «Аэрофлот» на начало 2023 года [3]

Цена одной акции компании на 2 января 2023 года составила 28 рублей.
Динамика за 2023 год у компании ПАО «Аэрофлот»:

$$\frac{38,83}{28} \times 100\% = 138,68\%.$$

Найдем второй критерий (дивидендная доходность).



Рис. 8. Дивидендная доходность Apple Inc. [4]

Как видно из представленного графика, Apple Inc. демонстрирует стабильные выплаты дивидендов на протяжении последних лет. В 2023 году дивидендная доходность составила 0,55%, что делает компанию привлекательной для инвесторов, ориентированных на получение пассивного дохода.

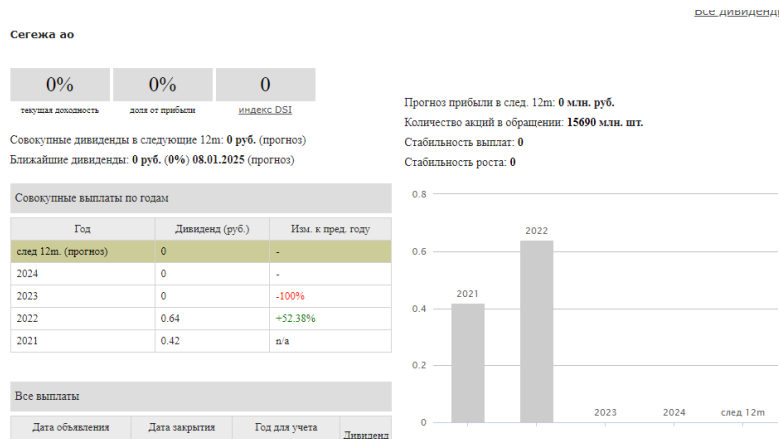


Рис. 9. Дивидендная доходность ПАО «Сегежа Групп» [5]

Данные показывают, что ПАО «Сегежа Групп» в 2023 году не осуществляла выплаты дивидендов.

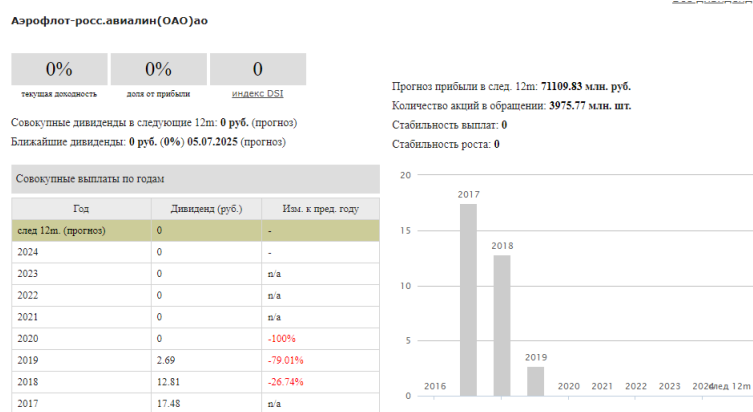


Рис. 10. Дивидендная доходность ПАО «Аэрофлот» [6]

На основании графика видно, что ПАО «Аэрофлот» прекратило выплачивать дивиденды с 2019 года.

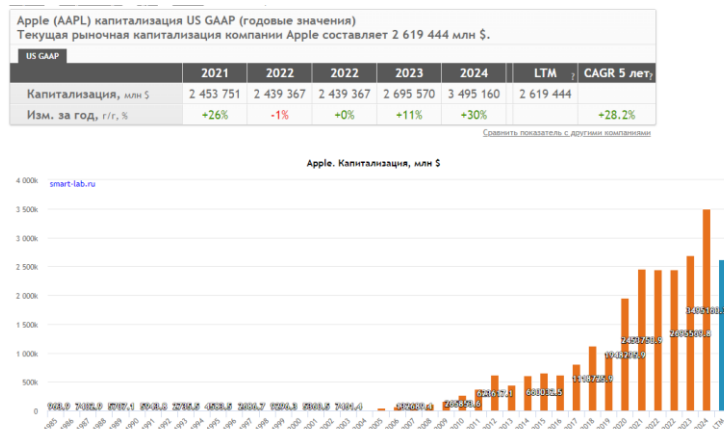


Рис. 11. Рыночная капитализация Apple Inc. [7]

На основе данных видно, что рыночная капитализация Apple Inc. на январь 2024 года составила 2695,57 млрд долларов США.

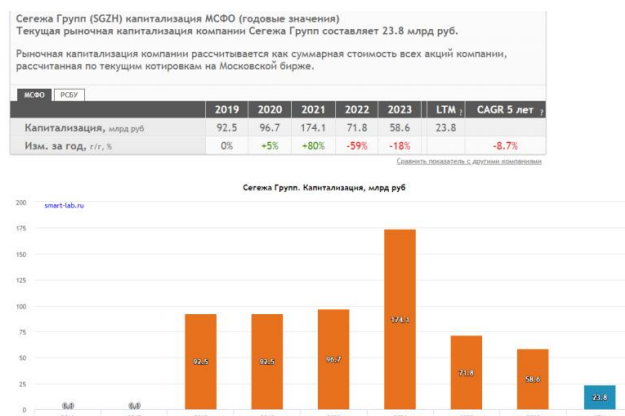


Рис. 12. Рыночная капитализация ПАО «Сегежа Групп» [8]

Переведем 58,6 млрд рублей в доллары по курсу на январь 2024 года. Для этого разделим 58,6 на 88,9856. Рыночная капитализация ПАО «Сегежа Групп» в пересчете на доллары США составила 0,66 млрд долларов.

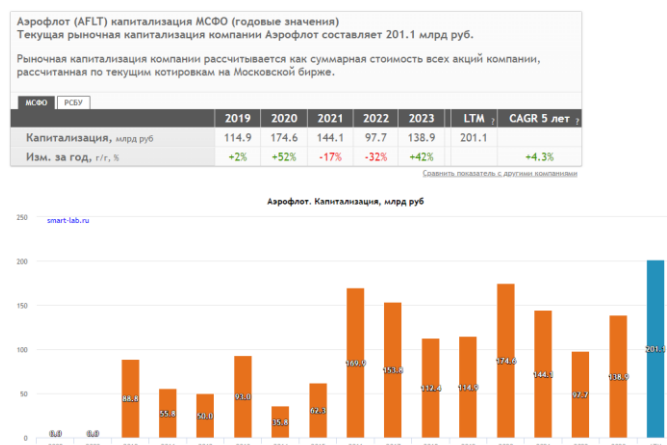


Рис. 13. Рыночная капитализация ПАО «Аэрофлот» [9]

Рыночная капитализация ПАО «Аэрофлот» составила 1,56 млрд долларов.

Найдем коэффициент осцилляции – разницу между максимальной и минимальной ценой в течение года, поделенная на среднегодовую цену.

Apple 239,59 +2,26 (+0,95%)

Дата	Максимум	Минимум	Разница	Среднее	Изм. %
12.01.2023	133,41	133,88	134,26	131,44	-0.06%
11.01.2023	133,49	131,25	133,51	130,46	+2.11%
10.01.2023	130,73	130,26	131,26	128,12	+0.45%
09.01.2023	130,15	130,46	133,41	129,89	+0.41%
08.01.2023	129,62	126,01	130,29	124,89	+3.68%
07.01.2023	125,02	127,13	127,77	124,76	-1.06%
06.01.2023	126,36	126,89	128,66	125,08	+1.03%
05.01.2023	125,07	130,28	130,90	124,17	-3.74%

Максимум: 199,62 Минимум: 124,17 Разница: 75,45 Среднее: 172,55 Изм. %: 48,18

Рис. 14. История цен акций Apple за 2023 год [10]

Коэффициент осцилляции для акций Apple рассчитывается следующим образом:

$$\frac{(199,62 - 124,17)}{172,55} = 43,73\%$$

Сегежа Групп 1,358 -0,067 (-4,70%)						
12.01.2023	4,817	4,813	4,873	4,800	26,12M	+0.08%
11.01.2023	4,813	4,787	4,840	4,762	25,64M	+0.90%
10.01.2023	4,770	4,800	4,806	4,691	22,67M	-0.23%
09.01.2023	4,781	4,639	4,842	4,635	52,87M	+3.17%
06.01.2023	4,634	4,649	4,649	4,602	6,38M	-0.22%
05.01.2023	4,644	4,672	4,695	4,630	10,05M	-0.56%
04.01.2023	4,670	4,670	4,734	4,612	14,66M	+0.32%
03.01.2023	4,655	4,582	4,672	4,575	13,17M	+1.73%
Максимум: 6,560 Минимум: 3,680 Разница: 2,880 Среднее: 5,233 Изм. %: -19,143						

Рис. 15. История цен акций ПАО «Сегежа Групп» за 2023 год [11]

Коэффициент осцилляции для акций ПАО «Сегежа Групп» определяется следующим образом:

$$\frac{(6,56 - 3,68)}{5,233} = 55,04\%$$

Аэрофлот 49,27 -1,24 (-2,45%)						
13.01.2023	27,68	27,52	28,18	27,26	9,94M	+0.58%
12.01.2023	27,52	27,74	27,92	27,16	12,46M	-0.58%
11.01.2023	27,68	26,80	27,90	26,72	20,63M	+3.59%
10.01.2023	26,72	26,08	26,88	25,80	14,27M	+2.45%
09.01.2023	26,08	25,50	26,28	25,50	11,00M	+2.44%
06.01.2023	25,46	25,70	25,70	25,30	4,01M	-0.55%
05.01.2023	25,60	25,02	25,90	25,00	11,31M	+2.24%
04.01.2023	25,04	24,64	25,08	24,62	3,07M	+1.62%
03.01.2023	24,64	24,74	24,80	24,60	1,95M	+0.16%
Максимум: 47,38 Минимум: 24,60 Разница: 22,78 Среднее: 37,27 Изм. %: 42,48						

Рис. 16. История цен акций ПАО «Аэрофлот» за 2023 год [12]

Коэффициент осцилляции для акций ПАО «Сегежа Групп» рассчитывается следующим образом:

$$\frac{(47,38 - 24,6)}{37,27} = 61,12\%.$$

Для удобства перенесем данные в одну таблицу:

Таблица 1

Данные критериев оценки по компаниям

	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»
K1 - Динамика за год, %	139,78%	84,42%	138,68%
K2 - Дивидендная доходность, %	0,55%	-	-
K3 - Отрасль	Электронные технологии (1)	Обрабатывающая промышленность (3)	Транспорт (2)
K4 - Рыночная капитализация, млрд. \$	2695,57	0,66	1,56
K5 - Коэффициент осцилляции	43,73%	55,04%	61,12%

На основании данных значений подготовимся к выбору наилучшей альтернативы методом анализа иерархий. Заполним матрицы сравнения вариантов выбора по критерию.

K1 (Динамика за год)	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»
A1 - Apple Inc.	1	7	2
A2 - ПАО «Сегежа Групп»	1/7	1	1/6
A3 - ПАО «Аэрофлот»	1/2	6	1
K2 (Дивидендная доходность)	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»
A1 - Apple Inc.	1	3	3
A2 - ПАО «Сегежа Групп»	1/3	1	1
A3 - ПАО «Аэрофлот»	1/3	1	1
K3 (Отрасль)	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»
A1 - Apple Inc.	1	7	5
A2 - ПАО «Сегежа Групп»	1/7	1	1/3
A3 - ПАО «Аэрофлот»	1/5	3	1
K4 (Рыночная капитализация)	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»
A1 - Apple Inc.	1	9	7
A2 - ПАО «Сегежа Групп»	1/9	1	1/3
A3 - ПАО «Аэрофлот»	1/7	3	1
K5 (Коэффициент осцилляции)	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»
A1 - Apple Inc.	1	5	7
A2 - ПАО «Сегежа Групп»	1/5	1	3
A3 - ПАО «Аэрофлот»	1/7	1/3	1

Рис. 17. Заполненные матрицы попарных сравнений

Среднее геометрическое считается по трём значениям строки матрицы. После вычитывается вектор приоритетов по формуле:

$$w_i = \frac{\bar{x}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{x}_j},$$

где $\bar{x}_i$ – i-ое среднее геометрическое значение; $\sum_{j=1}^n \bar{x}_j$ – сумма всех средних геометрических значений.

K1 (Динамика за год)	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»	Среднее геометрическое	Вектор приоритетов
A1 - Apple Inc.	1	7	2	2,410142264	0,582149192
A2 - ПАО «Сегежа Групп»	1/7	1	1/6	0,287684791	0,069487794
A3 - ПАО «Аэрофлот»	1/2	6	1	1,44224957	0,348363014
			СУММА	4,140076626	1
K2 (Дивидендная доходность)	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»		
A1 - Apple Inc.	1	3	3	2,080083823	0,6
A2 - ПАО «Сегежа Групп»	1/3	1	1	0,693361274	0,2
A3 - ПАО «Аэрофлот»	1/3	1	1	0,693361274	0,2
			СУММА	3,466806372	1
K3 (Отрасль)	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»		
A1 - Apple Inc.	1	7	5	3,27106631	0,730644671
A2 - ПАО «Сегежа Групп»	1/7	1	1/3	0,362460124	0,080961232
A3 - ПАО «Аэрофлот»	1/5	3	1	0,843432665	0,188394097
			СУММА	4,4769991	1
K4 (Рыночная капитализация)	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»		
A1 - Apple Inc.	1	9	7	3,979057208	0,785391188
A2 - ПАО «Сегежа Групп»	1/9	1	1/3	0,333333333	0,065793742
A3 - ПАО «Аэрофлот»	1/7	3	1	0,753947441	0,14881507
			СУММА	5,066337982	1
K5 (Коэффициент осцилляции)	A1 - Apple Inc.	A2 - ПАО «Сегежа Групп»	A3 - ПАО «Аэрофлот»		
A1 - Apple Inc.	1	5	7	3,27106631	0,730644671
A2 - ПАО «Сегежа Групп»	1/5	1	3	0,843432665	0,188394097
A3 - ПАО «Аэрофлот»	1/7	1/3	1	0,362460124	0,080961232
			СУММА	4,4769991	1

Рис. 18. Рассчитанные средние геометрические и вектора приоритетов

Проанализировав полученные результаты вычисления оценки каждой из альтернатив по критериям, можно прийти к выводу, что по всем критериям лучшей альтернативой является Apple Inc.

Стоит отметить, что метод анализа иерархий (МАИ) основан на последовательном сравнении альтернативных вариантов по ряду критериев, в результате чего формируются так называемые матрицы попарных сравнений [13].

Кроме того, теоретические исследования, представленные Малышевой А.К., Абдуллаевой А.М. [14] и Алексеевым Г.В. [15], подтверждают практическую применимость МАИ для снижения влияния субъективных оценок и повышения объективности анализа инвестиционных альтернатив.

Проведем расчеты $\lambda_{\max}$, индекса однородности и отношения однородности. Максимальное собственное число ($\lambda_{\max}$) необходимо для проверки согласованности оценок. После того как заполнится матрица попарных сравнений, рассчитывается собственный вектор приоритетов. Чтобы удостовериться, что экспертные суждения не противоречат друг другу, высчитывается $\lambda_{\max}$ этой матрицы и используется $\lambda_{\max}$ при вычислении индекса однородности (ИО) [16, 17].

$$\lambda_{\max} = e^T * A * W,$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное собственное число матрицы;

e^T – транспонированный единичный вектор (вектор-столбец из n строк);

A – матрица парных сравнений;

W – вектор приоритетов.

Расчет индекса однородности производится по формуле:

$$\text{ИО} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1),$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное собственное число матрицы;

n – число строк матрицы.

При помощи ИО ищется отношение однородности (ОО):

$$\text{ОО} = \text{ИО} / \text{М(ИО)},$$

где ИО – индекс однородности;

М(ИО) – математическое ожидание индекса однородности, определяемое по табл. 2.

Таблица 2

Математическое ожидание индекса однородности [18]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
М(ИО)	0,00	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45
n	10	11	12	13	14	15			
М(ИО)	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59			

Единичный вектор			$e^T * A$		$\lambda_{\max} = (e^T * A) * W$		Индекс однородности	Отношение однородности
1	1	1	1,642857	14	3,166667	3,032366617	0,016183309	0,027902256
			1,666667	5	5	3	0	0
			1,342857	11	6,333333	3,06488758	0,03244379	0,055937569
			1,253968	13	8,333333	3,080299844	0,040149922	0,069224003
			1,342857	6,333333	11	3,06488758	0,03244379	0,055937569

Рис. 19. Расчет параметров $\lambda_{\max}$, индекса однородности и отношения однородности

Индекс однородности (ИО) показывает, насколько единообразны наши суждения. Рассмотрим частный случай, если ИО слишком велик, это значит, что в матрице присутствуют противоречия: один и тот же объект может оказаться одновременно и лучше, и хуже

другого по разным сравнениям. Подобная ситуация сигнализирует, что оценки следует пересмотреть. Когда же отношение однородности ($OO = IO / M(IO)$) не превышает 0,1, мы можем быть уверены, что логика оценок в целом не вызывает серьезных сомнений.

Полученные значения отношения однородности меньше 0,1, следовательно, можно сделать вывод, что матрицы построены верно, суждения являются однородными [19].

На основе проведенного анализа были собраны ключевые показатели компаний, включающие динамику стоимости акций, дивидендную доходность, отрасль, рыночную капитализацию и коэффициент осцилляции. Эти параметры позволяют провести объективную оценку и сопоставление компаний с использованием метода анализа иерархий.

Следующим этапом является процедура свертки, или иерархического синтеза, которая заключается в объединении локальных векторов приоритетов, полученных для каждого критерия, в единый итоговый рейтинг альтернатив [19].

Иерархический синтез (свертки) - способ объединить результаты из разных матриц сравнения, чтобы получить общий рейтинг альтернатив. Сначала ведется подсчет вектора приоритетов для каждого критерия (например, динамики акций, дивидендной доходности), потом вычисляется «вес» этих критериев относительно друг друга, а уже потом происходит процесс умножения векторов приоритетов на другие. Так постепенно «сворачивается» вся иерархия: сначала внутри группы критериев, а затем и на самом верхнем уровне, где определяется итоговый фаворит.

На данном этапе будут построены матрицы попарных сравнений и рассчитаны весовые коэффициенты для каждого критерия, что обеспечит структурированное принятие решений, на основе собранных данных [20].

Проведем свертку второго уровня. Найдем критерии E_1^2 и E_2^2 .

Критерий «Динамика за год» отражает способность компании к росту, что делает его ключевым для оценки краткосрочной привлекательности инвестиций. Рост стоимости акций показывает, насколько эффективно компания использует свои ресурсы и привлекает инвесторов.

Критерий «Дивидендная доходность» важна для инвесторов, ориентированных на получение регулярного дохода. Однако её значимость может уступать динамике стоимости акций, особенно для компаний с высокой капитализацией, где акцент делается на реинвестирование прибыли.

Отрасль определяет долгосрочные перспективы компании. Например, высокотехнологичные компании могут иметь большие темпы роста, чем традиционные отрасли, такие как производство или лесозаготовка. Однако влияние этого критерия, как правило, опосредованное, так как оно проявляется через другие показатели.

Для проведения свертки необходимо построить матрицы парных сравнений критериев.

Сравнение критериев						
Сравнение по критерию "Потенциальная доходность"						
Динамика за год	1	3	4		2,289428485	0,625013074
Дивидендная доходность	1/3	1	2		0,873580465	0,238487123
Отрасль	1/4	1/2	1		0,5	0,136499803
				СУММА	3,66300895	1
Сравнение по критерию "Надежность"						
Рыночная капитализация	1	3			1,732050808	0,75
Коэффициент осцилляции	1/3	1			0,577350269	0,25
				СУММА	2,309401077	1
Сравнение по критерию "Выбор наилучшего варианта инвестирования"						
Потенциальная доходность	1	2			1,414213562	0,666666667
Надежность	1/2	1			0,707106781	0,333333333
				СУММА	2,121320344	1

Рис. 20. Построение трех матриц парных сравнений критериев

Так как первая матрица парных сравнений по критерию «Потенциальная доходность» третьего порядка необходимо посчитать отношение однородности для проверки однородности суждений.

Единичный вектор			e ¹ *A		λmax = (e ¹ *A)*W		Индекс однородности	Отношение однородности
1	1	1	1,58333	4,5	7	3,018294707	0,009147354	0,01577129
СУММА	3,66300895	1						

Рис. 21. Проверка матрицы парных сравнений по критерию «Потенциальная доходность» на однородность суждений

Полученное значение отношения однородности меньше 0,1, что подтверждает правильность построения матрицы и однородности суждений. Две следующие матрицы парных сравнений второго порядка, следовательно, считать отношение однородности для них не нужно.

Для проведения свертки необходимо умножить матрицу, состоящую из векторов приоритетов конкретных критериев на вектор, который отражает сравнение важности этих критериев.

Иерархический синтез			
Свертка критерия "Потенциальная доходность"			
	0,582149192	0,6	0,730644671
	0,069487794	0,2	0,080961232
	0,348363014	0,2	0,188394097
	0,606675984		
	0,102179396		
	0,29114462		
Вектор приоритетов "Потенциальная доходность"			
			0,625013074
			0,238487123
			0,136499803

Рис. 22. Свертка критерия E_1^2 (Потенциальная доходность)

По критерию E_1^2 можно сделать вывод, что наилучшей альтернативой является A1 (Apple Inc.).

Показатель «Рыночная капитализация» отражает масштаб и устойчивость компании на рынке. Чем выше рыночная капитализация, тем меньше вероятность резких изменений стоимости акций или банкротства. Компании с большой рыночной капитализацией, как правило, обладают высокой надёжностью. Этот критерий может быть оценён как наиболее значимый для определения общей стабильности компании.

Коэффициент осцилляции показывает уровень волатильности акций компании. Низкие значения свидетельствуют о стабильности цен и меньших рисках для инвесторов. Однако этот критерий носит более временный характер по сравнению с рыночной капитализацией и может быть менее значимым для долгосрочных инвестиций.

Свертка критерия "Надежность"			
	0,785391188	0,730644671	
	0,065793742	0,188394097	
	0,14881507	0,080961232	
	0,771704559		
	0,096443831		
	0,13185161		
Вектор приоритетов "Надежность"			
			0,75
			0,25

Рис. 23. Свертка критерия E_2^2 (Надежность)

По критерию E_2^2 можно сделать вывод, что наилучшей альтернативой также является A1 (Apple Inc.).

Теперь выполним свертку первого уровня.

Критерий «Потенциальная доходность» отражает ожидаемую выгоду от вложений. Инвесторы, ориентированные на высокую прибыль в краткосрочной или среднесрочной перспективе, обычно придают этому критерию первостепенное значение. Он включает такие параметры, как динамика стоимости акций, дивидендная доходность и перспективы отрасли.

Надежность показывает устойчивость компании и минимизацию рисков. Этот критерий особенно важен для инвесторов, стремящихся к долгосрочной безопасности своих вложений. Сюда входят такие параметры, как рыночная капитализация и коэффициент осцилляции.

Свертка критерия "Выбор наилучшего варианта инвестирования"			
	0,606675984	0,771704559	
	0,102179396	0,096443831	
	0,29114462	0,13185161	
	0,661685509		
	0,100267541		
	0,23804895		
Вектор приоритетов "Выбор наилучшего варианта для инвестирования"			
			0,66666667
			0,33333333

Рис. 24. Свертка критерия E_1^1 (Выбор наилучшего варианта инвестирования)

Выводы. Был проведён сравнительный анализ трёх компаний (Apple Inc., ПАО «Сегежа Групп», ПАО «Аэрофлот») с помощью метода анализа иерархий (МАИ) по критериям динамики акций, дивидендной доходности, отрасли, рыночной капитализации и коэффициента осцилляции. Итоги иерархического синтеза показали, что Apple Inc. лидирует по всем критериям, что делает её наиболее привлекательной с точки зрения, как роста капитала, так и стабильной доходности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. График Apple (AAPL) – Investing.com. – URL: <https://ru.investing.com/equities/apple-computer-inc-chart> (дата обращения: 03.12.2024).
2. График Segezha Group (SGZH) – Investing.com. – URL: <https://ru.investing.com/equities/segezha-group-pao-chart> (дата обращения: 03.12.2024).
3. График акций ПАО «Аэрофлот» – Investing.com. – URL: <https://ru.investing.com/equities/aeroflot-chart> (дата обращения: 03.12.2024).
4. Дивиденды Apple (AAPL) – Finrange. – URL: <https://finrange.com/ru/company/NASDAQ/AAPL/dividends> (дата обращения: 03.12.2024).
5. Дивиденды Segezha Group – Управляющая компания «ДОХОД». – URL: <https://www.dohod.ru/ik/analytics/dividend/sgzh> (дата обращения: 03.12.2024).
6. Дивиденды ПАО «Аэрофлот» – Управляющая компания «ДОХОД». – URL: <https://www.dohod.ru/ik/analytics/dividend/aflt> (дата обращения: 03.12.2024).
7. Капитализация Apple (AAPL) – smart-lab. – URL: https://smart-lab.ru/q/AAPL/GAAP/market_cap/ (дата обращения: 03.12.2024).
8. Капитализация Segezha Group (SGZH) – smart-lab. – URL: https://smart-lab.ru/q/SGZH/MSFO/market_cap/ (дата обращения: 03.12.2024).
9. Капитализация ПАО «Аэрофлот» (AFLT) – smart-lab. – URL: https://smart-lab.ru/q/AFLT/MSFO/market_cap/ (дата обращения: 03.12.2024).
10. Котировки акций Apple Inc. за прошлые периоды – Investing.com. – URL: <https://ru.investing.com/equities/apple-computer-inc-historical-data> (дата обращения: 03.12.2024).
11. Акции Segezha Group (SGZH) – Investing.com. – URL: <https://ru.investing.com/equities/segezha-group-pao> (дата обращения: 03.12.2024).
12. Акции ПАО «Аэрофлот» – Investing.com. – URL: <https://ru.investing.com/equities/aeroflot> (дата обращения: 03.12.2024).
13. Саати Т.Л. Метод анализа иерархий. – Нью-Йорк: Макгроу-Хилл, 1980.
14. Матышева А.К., Абдуллаева А.М. Выбор оптимального программного продукта для календарного планирования стратегии развития компании // Вестник кибернетики. – 2024. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-optimalnogo-programmnogo-produkta-dlya-kalendarnogo-planirovaniya-strategii-razvitiya-kompanii> (дата обращения: 05.12.2024).
15. Алексеев Г.В., Гонашвили А.С., Кирсанова Н.П., Садыкова Г.И., Холявин И.И., Усманов И.И. Задачи сетевого планирования в экономике, технологии и социологии. – СПб., 2023. – 118 с.
16. Саати Т.Л. Принятие решений с помощью метода аналитической иерархии // Международный журнал наук о сервисе. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 83-98.
17. Форман Э.Х., Гасс С.И. Процесс аналитической иерархии – изложение // Operations Research. – 1995. – Т. 43, № 3. – С. 649-669.
18. Мосолов А.С., Акинин Н.И. Компьютерные технологии и методы проектирования в сфере безопасности : учебник для вузов. – СПб.: Лань, 2021. – 444 с. – ISBN 978-5-8114-8034-0. – URL: <https://e.lanbook.com/book/183115> (дата обращения: 05.12.2024).
19. Картвелишвили Василий Михайлович, Лебедев Эдуард Андреевич. Метод анализа иерархий: критерии и практика // Вестник РЭА им. Г.В. Плеханова. – 2013. – №6 (60). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-analiza-ierarhiy-kriterii-i-praktika> (дата обращения: 05.12.2024).
20. Фурцев Д.Г., Коваленко А.Н., Ткаченко Е.А. Об оптимизации на основе метода анализа иерархий // Экономика. Информатика. – 2014. – № 1-1 (172). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsii-na-osnove-metoda-analiza-ierarhiy> (дата обращения: 05.12.2024).

REFERENCES

1. Grafik Apple (AAPL) – Investing.com [Apple (AAPL) chart – Investing.com]. Available at: <https://ru.investing.com/equities/apple-computer-inc-chart> (accessed 03 December 2024).

2. Grafik Segezha Group (SGZH) – Investing.com [Segezha Group (SGZH) chart – Investing.com]. Available at: <https://ru.investing.com/equities/segezha-group-pao-chart> (accessed 03 December 2024).
3. Grafik aktsiy PAO «Aeroflot» – Investing.com [PJSC “Aeroflot” Stock Chart]. Available at: <https://ru.investing.com/equities/aeroflot-chart> (accessed 03 December 2024).
4. Dividendy Apple (AAPL) – Finrange [Apple (AAPL) Dividends – Finrange]. Available at: <https://finrange.com/ru/company/NASDAQ/AAPL/dividends> (accessed 03 December 2024).
5. Dividendy Segezha Group – Upravlyayushchaya kompaniya «DOKhOD» [Segezha Group Dividends – “DOHOD” Management Company]. Available at: <https://www.dohod.ru/ik/analytics/dividend/sgzh> (accessed 03 December 2024).
6. Dividendy PAO «Aeroflot» – Upravlyayushchaya kompaniya «DOKhOD» [Dividends of PJSC “Aeroflot” – “DOHOD” Management Company]. Available at: <https://www.dohod.ru/ik/analytics/dividend/aflt> (accessed 03 December 2024).
7. Kapitalizatsiya Apple (AAPL) – smart-lab [Apple (AAPL) Market Capitalization]. Available at: https://smart-lab.ru/q/AAPL/GAAP/market_cap/ (accessed 03 December 2024).
8. Kapitalizatsiya Segezha Group (SGZH) – smart-lab [Segezha Group (SGZH) Market Capitalization – smart-lab]. Available at: https://smart-lab.ru/q/SGZH/MSFO/market_cap/ (accessed 03 December 2024).
9. Kapitalizatsiya PAO «Aeroflot» (AFLT) – smart-lab [PJSC “Aeroflot” (AFLT) Market Capitalization – smart-lab]. Available at: https://smart-lab.ru/q/AFLT/MSFO/market_cap/ (accessed 03 December 2024).
10. Kotirovki aktsiy Apple Inc. za proshlye periody – Investing.com [Apple Inc. Stock Quotes for Past Periods — Investing.com]. Available at: <https://ru.investing.com/equities/apple-computer-inc-historical-data> (accessed 03 December 2024).
11. Aktsii Segezha Group (SGZH) – Investing.com [Segezha Group (SGZH) Stock – Investing.com]. Available at: <https://ru.investing.com/equities/segezha-group-pao> (accessed 03 December 2024).
12. Aktsii PAO «Aeroflot» – Investing.com [PJSC “Aeroflot” Stock – Investing.com]. Available at: <https://ru.investing.com/equities/aeroflot> (accessed 03 December 2024).
13. Saati T.L. Metod analiza ierarkhiy [The analytic hierarchy process]. N'yu-York: Makgrou-Khill, 1980.
14. Malysheva A.K., Abdullaeva A.M. Vybor optimal'nogo programmnogo produkta dlya kalendarnogo planirovaniya strategii razvitiya kompanii [Choosing the optimal software product for calendar planning of a company's development strategy], *Vestnik kibernetiki* [Bulletin of Cybernetics], 2024, No. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-optimalnogo-programmnogo-produkta-dlya-kalendarnogo-planirovaniya-strategii-razvitiya-kompanii> (accessed 05 December 2024).
15. Alekseev G.V., Gonashvili A.S., Kirsanova N.P., Sadykova G.I., Kholyavin I.I., Usmanov I.I. Zadachi setevogo planirovaniya v ekonomike, tekhnologii i sotsiologii [Tasks of network planning in economics, technology, and sociology]. Saint Petersburg, 2023, 118 p.
16. Saati T.L. Prinyatie resheniy s pomoshch'yu metoda analiticheskoy ierarkhii [Decision making with the analytic hierarchy process], *Mezhdunarodnyy zhurnal nauk o servise* [International Journal of Services Sciences], 2010, Vol. 3, No. 2, pp. 83-98.
17. Forman E.Kh., Gass S.I. Protsess analiticheskoy ierarkhii – izlozhenie [The analytic hierarchy process – an exposition], *Operations Research* [Operations Research], 1995, Vol. 43, No. 3, pp. 649-669.
18. Mosolov A.S., Akinin N.I. Komp'yuternye tekhnologii i metody proektirovaniya v sfere bezopasnosti: uchebnyk dlya vuzov [Computer technologies and design methods in the field of security: a textbook for universities]. Saint Petersburg: Lan', 2021, 444 p. ISBN 978-5-8114-8034-0. Available at: <https://e.lanbook.com/book/183115> (accessed 05 December 2024).
19. Kartvelishvili Vasilii Mikhaylovich, Lebedyuk Eduard Andreevich. Metod analiza ierarkhiy: kriterii i praktika [The analytic hierarchy process: criteria and practice], *Vestnik REA im. G.V. Plekhanova* [Bulletin of G.V. Plekhanov REA], 2013, No. 6 (60). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-analiza-ierarkhiy-kriterii-i-praktika> (accessed 05 December 2024).
20. Furtsev D.G., Kovalenko A.N., Tkachenko E.A. Ob optimizatsii na osnove metoda analiza ierarkhiy [On optimization based on the analytic hierarchy process], *Ekonomika. Informatika* [Economics. Informatics], 2014, No. 1-1 (172). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-optimizatsii-na-osnove-metoda-analiza-ierarkhiy> (accessed 05 December 2024).

Богнюков Александр Алексеевич – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: bogniukovv@gmail.com; г. Волгоград, Россия; студент.

Зорькин Дмитрий Юрьевич – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: mosh285@gmail.com; г. Волгоград, Россия; преподаватель кафедры ПМ.

Тарасова Ирина Александровна – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: irina_a_tarasova@vk.com; г. Волгоград, Россия; зав. кафедрой ПМ; доцент.

Bognyukov Alexander Alekseevich – Volgograd State Technical University; e-mail: bognyukovv@gmail.com; Volgograd, Russia; student.

Zorkin Dmitry Yuryevich – Volgograd State Technical University; e-mail: mosh285@gmail.com; Volgograd, Russia; teacher of PM department.

Tarasova Irina Alexandrovna – Volgograd State Technical University; e-mail: irina_a_tarasova@vk.com; Volgograd, Russia; head of the PM Department; associate professor.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-153-164

С.Л. Беляков, Л.А. Израилев

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ОБОБЩЕНИЯМИ

Основной проблемой при принятии решений в аварийных ситуациях остается достоверность этих решений. Аварийные ситуации в силу своей непредсказуемой и динамичной природы протекания часто обладают неполной и неточной информацией. Использование накопленного опыта позволяет находить достоверные решения, опираясь на известные прецеденты аварийных ситуаций. В качестве инструмента накопления опыта и генерации на его основе решений могут выступать геоинформационные системы (ГИС). Картографическая основа ГИС позволяет анализировать аварийные ситуации, учитывая их пространственно-временные характеристики. Однако, картографическое представление прецедентов с принятыми решениями описывает их слишком узко. Нет понимания того, какие свойства ситуации являются значимыми и можно ли применить решение прецедента в других обстоятельствах. Использование известных образов и их допустимых преобразований, созданных на основе экспертных знаний, способно решить эту проблему. Образ обобщает множество схожих по смыслу прецедентов. Цель такого обобщения заключается в расширение области применения информации из частных наблюдений за счет определения границ допустимых преобразований. Однако необходимость привлечения экспертов для их создания является труднореализуемой задачей, так как каждая ситуация по своему уникальна. Не менее проблематичным остается перенос опыта из одной пространственно-временной области в другую. В данной работе рассматривается подход к автоматическому порождению образов. Предлагается способ создания геоинформационной модели аварийных ситуаций, который включает обобщение прецедентов по общему местоположению. Этот подход направлен на повышение достоверности прогнозирования аварийных ситуаций. Был проведен эксперимент по синтезу образов, основанных на прецедентах дорожно-транспортных происшествий, и оценена их эффективность по сравнению с отдельными прецедентами. Использование разработанного метода автоматической обработки данных для создания образов является актуальным, так как значительно снижает затраты на получение знаний. Применение пространственных обобщений также устраняет необходимость в экспертных знаниях, поскольку формирование наборов прецедентов осуществляется путем анализа их географического расположения.

Геоинформационные системы; прецедентный анализ; аварийные ситуации; опыт; информационная поддержка принятия решений.

S.L. Belyakov, L.A. Izrailev

GEOINFORMATION MODELS OF EMERGENCY SITUATIONS WITH SPATIAL GENERALIZATIONS

The main problem of decision making in emergency situations is the reliability of these decisions. Emergency situations by virtue of its unpredictable and dynamic nature often have incomplete and inaccurate information. The use of accumulated experience allows to find reliable solutions based on known precedents of emergency situations. Geographic information systems (GIS) can act as a tool for accumulating experience and generating solutions based on it. The cartographic basis of GIS allows analyzing emergency situations, taking into account their spatial and temporal characteristics. However, the cartographic representation of precedents with adopted solutions describes them too narrowly. There is no idea what properties of the situation are significant and whether the precedent solution can be applied in other circumstances. The use of known images and their admissible transformations, created on the basis of expert knowledge, can solve this problem. The image generalizes a set of similar precedents. The purpose of such generalization is to expand the area of application of information from private observations by determining the boundaries of permissible transformations. However, the need to attract experts for their creation is a difficult task, since each situation is unique in its own way.

No less problematic is the transfer of experience from one spatial and temporal domain to another. In this paper we consider an approach to automatic image generation. We propose a method of creating a geoinformation model of emergency situations, which includes the generalization of precedents on a common location. This approach is aimed at improving the reliability of prediction of emergency situations. An experiment was conducted to synthesize images based on precedents of road accidents and evaluate their effectiveness compared to individual precedents. The use of the developed method of automatic data processing to create images is relevant, as it significantly reduces the cost of knowledge acquisition. The use of spatial generalizations also eliminates the need for expert knowledge, since the formation of precedent sets is performed by analyzing their geographical location.

Geographic information systems; case-based reasoning; emergencies; experience; informational support of decision-making.

Введение. Аварийная ситуация (АС) – сочетание условий и обстоятельств, создающих аварийную обстановку, которая в случае дальнейшей эскалации может привести к происшествию с последующим возникновением ущерба. Прогнозирование АС способствует снижению риска (вероятности) происшествия [1]. Не все АС возможно достоверно прогнозировать, так как некоторые из них трудно поддаются формализации для построения математического прогноза. К таковым можно отнести транспортные АС, природа которых носит хаотичный и непредсказуемый характер по причине того, что набор факторов, приводящих к риску, и их влияние непрерывно меняется. Преобразуется дорожная инфраструктура и характеристики транспортных средств. В этих условиях предотвращение АС целесообразно строить как генерацию решений на основе накопленного опыта. Одним из источников опыта может выступать информация, получаемая из разбора соответствующих прецедентов АС [2–4]. Разбор выполняется квалифицированными специалистами и документируется. Эта информация может рассматриваться как экспертная оценка причин возникновения АС и решений, которые принимались участниками.

Прецедент АС включает схематическое или картографическое описание характеристик ситуации и его решения, а также необходимую по регламентам анализа текстовую информацию. На основе этой информации, справедливо можно предположить, что если в будущем возникнет ситуация с аналогичными характеристиками, то она приведет к такому же исходу, что в прецеденте, произошедшем ранее. Таким образом, можно заранее принять необходимые меры либо для предотвращения ситуации, либо для смягчения последствий. Из-за случайной природы аварий, характеристики каждой новой АС могут отличаться, из-за чего поиск похожего прецедента затруднен. Сложность также заключается в определении того, какие характеристики (факторы) ситуации являются значимыми. На рис. 1,а,б представлен пример транспортной АС. На рис. 1,а происшествие произошло на нерегулируемом перекрестке, на рис. 1,б на регулируемом перекрестке. Являются ли прецеденты идентичными и возможно ли применить решения одного прецедента к другому? Без применения соответствующих экспертных знаний достоверно ответить на этот вопрос невозможно.

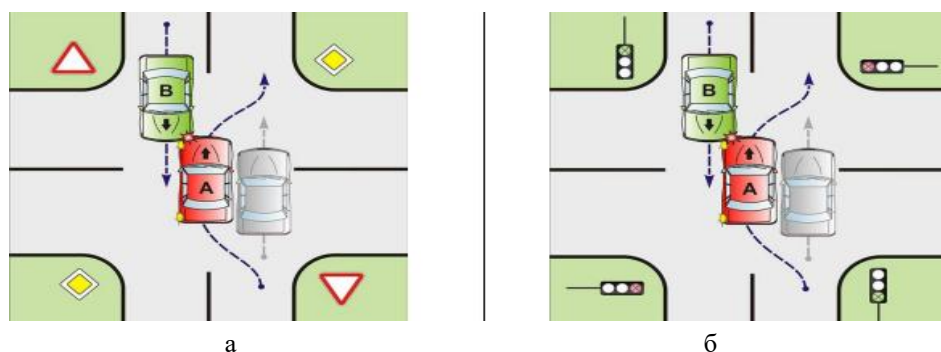


Рис. 1. Пример схожих АС на нерегулируемом перекрестке (а) и на регулируемом перекрестке (б)

Обобщение накопленного опыта на основе известных ситуаций, позволит эффективнее находить решения для новых ситуаций. Под обобщением подразумевается переход от анализа разрозненных частных случаев к анализу наборов ситуаций, образованных общим понятием. Общее понятие – это одна или группа характеристик, обладающие свойством значимости по отношению к ситуации. Цель подобного обобщения – расширение области применения информации из частных наблюдений за счет определения границ допустимых преобразований. Применение обобщений направлено на создание обобщенного образа ситуации.

Образ АС включает в себя совокупность факторов, которые повлияли на возникновение аварийной обстановке и определяют его изменчивость. Знание о возможных изменениях ситуаций, сохраняющих их смысловое наполнение, открывает путь к конструированию адекватных решений. Образ задает допустимые преобразования конкретного прецедента. Допустимые преобразования (ДП) – это картографические объекты, имеющие пространственные границы и атрибуты. Если текущая ситуация на основании выбранной метрики сходства является одним из возможных экземпляров образа – наступление АС практически неизбежно. Образ обобщает множество схожих по смыслу прецедентов. Один экземпляр прецедента и экспертные обобщения о возможных изменениях открывают возможность неявно оперировать большим числом объектов. Поскольку обобщения сделаны на основе наблюдения реального мира, частные выводы считаются достоверными. Одним из наиболее эффективных инструментов представления образов АС можно рассматривать геоинформационные системы (ГИС). Пространственное отображение позволяет накапливать пространственно-временную информацию не только о свойствах ситуации, но и особенностях местности их возникновения. ГИС обладают богатым инструментарием, с помощью которого могут быть получены знания о ситуациях. В первую очередь, это программные инструменты визуализации. Интуитивные представления, обобщения и заключения эксперт передает интеллектуальной системе с минимальными потерями. Манипулирование знаниями реализуется через операции с визуальными картографическими объектами.

Привлечение экспертов к созданию образов является дорогостоящим, поэтому в данной работе рассматривается подход к автоматическому порождению образов. Непосредственно применить к имеющемуся множеству данных разбора АС невозможно по двум причинам:

- 1) каждый разбор является разнородным набором данных пространственно-временного характера, которые наполнены логическими зависимостями. Для них числовые модели машинного обучения неприменимы;
- 2) предлагаемый механизм построения обобщений нацелен на получение знания особой двухкомпонентной структуры в среде ГИС.

Применение разработанного метода построения образов автоматической обработкой данных актуально тем, что значительно сокращает затраты на формирование знаний.

Обзор литературы. Существующие методы прогнозирования АС основываются на двух подходах: математическом и эвристическом. Математический подход основан на анализе доступных данных о ключевых характеристиках прогнозируемого объекта. Он включает в себя обработку данных с использованием математических методов, моделирование и, в конечном итоге, создание зависимости, которая связывает эти характеристики со временем [5]. По применяемым методам данный подход условно можно разделить на две группы: методы моделирования процессов и статистические методы. Методы моделирования процессов включает в себя методы, основанные на обработке имеющихся данных об отдельных характеристиках объекта прогнозирования и создания его модели. В результате получаются зависимости, связывающие некоторые характеристики прогнозируемого объекта во времени. Среди методов прогнозирования стоит отметить линейную регрессию [6], байесовские сети [7, 8], нейросетевые методы [9, 10], вероятностные методы [11] и теорию катастроф [12]. Однако данные модели основаны на определенных предположениях и приближениях, которые не всегда могут отражать реальный характер аварии. Статистические методы опираются на обобщение статистических данных о рас-

смаатриваемом объекте или процессе. Результатом этого обобщения является аналитическая модель. Для оценки неизвестных параметров модели чаще всего применяются метод максимального правдоподобия, его вариация – метод частичных наименьших квадратов [13], а также метод взвешенных наименьших квадратов [14]. Прогнозирование в данном случае заключается в вычислении значений модели для заданного момента времени или при указанном значении другой независимой переменной. Математические методы обеспечивают объективный прогноз, но их сложно применять к неформализованным задачам. В настоящее время нет методов, сопоставимых с человеческими возможностями в построении образов на основе чисто качественной информации.

Эвристический (экспертный) подход заключается в привлечении мнений экспертов-специалистов. Он особенно эффективен для прогнозирования многофакторных и сложных процессов, которые трудно формализовать, но по которым имеется достаточно данных, основанных на опыте. Эвристическая деятельность человека, которая лежит в основе прогнозирования, смещается в область абстрактного мышления для формирования приемлемых гипотез о природе прогнозируемых процессов. В случае подтверждения гипотез опытом можно переходить к управлению процессом или к учету и использованию выявленных свойств анализируемого объекта. Следующим этапом является выработка взглядов относительно первопричин, которые приводят к обобщению полученных корреляций до уровня общего понятия. Среди подходов экспертного анализа стоит выделить:

1. Метод «Мозгового штурма» [15] – генерация большого количества идей путем открытого обсуждения проблемы между группой экспертов, из которых выбирается наилучшая. Однако, нет гарантий, что среди них найдутся рациональные и продуктивные решения.

2. Метод Дельфи [16] – опрос группы экспертов для получения их мнений и прогнозов по обозначенной проблеме. Метод направлен на повышение объективности опросов экспертов за счет использования процедур обратной связи, ознакомление экспертов с результатами предшествующего тура опроса и т. д. Однако метод более трудоемкий и не полностью устраняет субъективность прогнозирования.

Преимущество эвристического подхода состоит в способности эксперта-специалиста оперировать нечетко очерченными понятиями. При таком подходе экспертные рассуждения нередко ведутся на интуитивном уровне, в обход строгих логических умозаключений, что с одной стороны позволяет эффективно находить решения в сложных неформализованных задачах. Основная проблема эвристических методов состоит в необходимости поиска соответствующих экспертов, что в условиях тенденции к узкой специализации экспертов становится нетривиальной задачей. Другой немаловажный фактор – субъективность при построении прогноза. Данный фактор порождает неопределенность и «инертность» в результатах, так как вывод эксперта напрямую зависит от накопленного им опыта относительно предмета прогноза. По мере накопления нового опыта взгляд на построение модели прогноза может значительно измениться.

Развитие возможностей вычислительной техники позволило передать ей часть функций по предварительной обработке данных [17]. Следующий этап использования информационных систем – обобщение опыта. Опыт представляет собой совокупность мыслительных процессов и инстинктов человека, проявляющуюся в ситуациях с повторяющимися событиями и состояниями, а также в условиях цикличности процессов. Применение опыта оценки ситуаций и выработки решений имеет особую значимость при построении геоинформационных моделей ситуаций. Количество параметров, описывающих «ситуацию» как концепт рассуждений неопределенно, многозначно и противоречиво. Только коллективный опыт наблюдения и анализа ситуаций позволяет находить решения проблемных ситуаций. Не менее проблематичным остается перенос опыта из одной пространственно-временной области в другую.

Одним из известных методов, работающих с опытом, является метод рассуждений на основе прецедентов [18]. Суть метода состоит в нахождении прецедента, который был бы наиболее близким к новой ситуации. В случае нахождения такого прецедента, его решение используется для нового прецедента. Прецедентный анализ используется в том

числе для задач предупреждения и ликвидации техногенных чрезвычайных ситуаций [19]. Ввиду того, что большинство аварий имеют ярко выраженные пространственные характеристики, неотъемлемым элементом системы прогнозирования с использованием прецедентов становится ее интеграция с системами ГИС для визуализации и пространственного анализа [20]. Цикл рассуждений реализуется следующим образом: определяется степень сходства между новым прецедентом и существующими. Затем извлекается прецедент с наибольшим сходством и его решение применяется к новой ситуации, которое при необходимости адаптируется к новым условиям. Решенный прецедент сохраняется для дальнейшего использования. Ограничением прецедентного анализа выступает необходимость определения адекватных метрик сходства для определения схожих прецедентов. При этом, для эффективного использования метода потребуются использование экспертных знаний, чтобы иметь возможность преобразовывать решение известного прецедента с учетом наличия расхождений между ситуациями или потери актуальности решения ввиду устаревания информации.

Предлагаемая модель опыта. Как было сказано выше, не имея возможности достоверно прогнозировать риски возникновения АС (прецедента АС), можно использовать ранее накопленный опыт, который включает описание прошлого взаимодействия с подобными прецедентами. Однако данный способ изучения окружающей среды имеет ряд ограничений:

1. Увеличение количества прецедентов приводит к росту сложности расчета сходства объектов и требует больше ресурсов для хранения информации.
2. Неопределенность степени детализации прецедента. Детали играют ключевую роль в определении характеристик прецедента и его решения. Однако, чем выше степень детализации, тем больше различий может возникать при поиске похожих прецедентов, что в условиях недостатка экспертных знаний грозит тем, что близкий прецедент не будет обнаружен.

Данные ограничения исходят из той общей проблемы, что без определения значимых факторов ситуации невозможно проводить достоверные рассуждения о сходстве или различии прецедентов. В то время как значимость фактора ситуации можно определить только с помощью экспертных знаний. Преимущество применения обобщения позволит не только избежать необходимости детализировать информацию о прецедентах, но и оптимизировать процесс накопления опыта. Также это позволяет определить ДП ситуации, на основании различий в характеристиках ситуаций. В контексте обобщения прецедентов можно выделить следующие подходы:

1. Обобщение отдельных признаков прецедентов в общее понятие. Например, обобщение «регулируемых» и «нерегулируемые перекрестков» в понятие перекрестки. При сравнении нескольких прецедентов это позволит считать близкими все прецеденты АС на пересечениях дорог независимо от их вида. Однако без предварительного использования экспертного знания данное обобщение нельзя считать достоверным, так как нет уверенности в том, что решение прецедентов останется прежним при таком обобщении.
2. Обобщение схожих прецедентов в образную модель. За счет объединения информации некоторого множества прецедентов в единый образ становится возможным определить ДП ситуации, которые не изменяют результата. Для соответствия условию неизменности сути задачи, прецеденты должны иметь общие характеристики.

В качестве основного подхода выберем второй подход, так как первый требует обязательного использования экспертных знаний для обобщения, что является существенным ограничением при использовании в самообучающихся системах. Однако, чтобы применить обобщение схожих прецедентов, для начала необходимо определить общий признак, на основании которого будет проводиться обобщение.

Прецедент АС следует рассматривать как точечный объект, который лишь условно указывает на место его возникновения, в то время как зоны возникновения АС и зоны последствий АС, отражаются на соответствующих схемах. Участки, где произошло сразу несколько АС, относятся к «горячим точками» [21] или участкам повышенной опасности (УПО) [22]. Статистическая значимость ситуации расположенных в зоне УПО определя-

ется тем, что происходит повторение прецедентов, что говорит о неслучайном характере аварий. Следовательно, существует паттерн, который определяется совокупностью одних и тех же характеристик прецедента. По своему влиянию на АС характеристики можно разделить на: главные – характеристики, определяющие АС и второстепенные – характеристики, которые могут влиять на риск возникновения или степень последствий происшествия, но не являются его первопричиной. Выбрав характеристику местоположения как главную, можно создать образ путем обобщения группы прецедентов, расположенных в одном и том же месте.

Сформулируем алгоритм синтеза образов на основе общего местоположения (зона концентрации прецедентов) в виде геоинформационной модели:

1) Подготовка исходных данных о прецедентах. Информация о прецедентах АС обязательно должна содержать пространственно-временные характеристики, а также описание свойств окружающей среды на момент происшествия.

2) Формирование наборов прецедентов, подходящих для обобщения. Для определения мест концентрации прецедентов можно воспользоваться инструментами пространственного анализа (например, кластеризация на основе плотности, индекс Морана, анализ горячих точек (Статистика Getis-Ord G_i^*), ядерная оценка плотности (KDE)).

3) Объединение наборов прецедентов в образы. Концептуальную модель прецедента можно представить следующим образом:

$$P = \langle s, d \rangle,$$

где s – схема ситуации, d – схема решения.

Аналогично можно представить концептуальную модель образа [23]:

$$I_p = \langle I_s, I_d \rangle,$$

где I_s – набор ДП ситуации, I_d – набор преобразований решения.

Допустим у нас есть два прецедента, представленных следующим образом:

$$P_1 = (x_1, x_2, \dots, x_n, R), P_2 = (y_1, y_2, \dots, y_n, K),$$

где $x_1 \dots x_n$ и $y_1 \dots y_n$ – параметры ситуации, описывающий прецедент P_1 и P_2 соответственно (при этом: $x_1 \in S_1, x_2 \in S_2, \dots, x_n \in S_n, y_1 \in S_1, y_2 \in S_2, \dots, y_n \in S_n$), R – решение прецедента P_1 , K – решение прецедента P_2 , n – количество параметров у прецедентов P_1 и P_2 , $S_1, \dots, S_n$ – области допустимых значений соответствующих параметров прецедента.

Таким образом, для сформированных наборов прецедентов можно установить логические правила обобщения характеристик в виде продукции:

$$\text{ЕСЛИ } x_n \neq y_n \text{ ТО } I_s = x_n \vee y_n \text{ ИНАЧЕ } I_s = x_n;$$

$$\text{ЕСЛИ } R \neq K \text{ ТО } I_d = R \vee K \text{ ИНАЧЕ } I_d = R;$$

Все различия в характеристиках внутри набора прецедентов рассматриваются как ДП нового образа. В ином случае, сохраняется только первая характеристика. Например, если прецеденты в одном и том же месте фиксировались в «светлое» и «темное» время суток, значит можно сказать, что ДП характеристики времени суток включают и «светлое» и «темное» время суток (напротив, состояние времени суток «Сумерки» по-прежнему не входит в ДП образа, до тех пор пока не будет найден прецедент в том же местоположении, но в период времени суток «Сумерки»).

4) Выдвижение гипотезы о причинах возникновения прецедентов. Когда образ сформирован, необходимо дать объяснение, почему именно данная совокупность характеристик прецедентов приводит к систематическим АС в данном месте. В качестве источника для формирования гипотезы могут быть использованы ранее синтезированные «проверенные образы» или «эталонные образы». Проверенные образы – это те образы, которые обладают наивысшим критерием качества. Эталонные образы – часть ограниченного множества образов, подготовленных экспертами.

5) Расчет критериев качества синтезированного образа. Полученный образ необходимо проверить на соответствие критериям качества. Первый критерий – значимость. Чем больше прецедентов составляют образ, тем больше статистическая значимость об-

раза. Вторым критерий – актуальность. Актуальность образа на основе прецедентов – это совокупность таких параметров, как: частота возникновения схожих с образом прецедентов и соответствие образа существующим условиям. Частота возникновения схожих с образом прецедентов, это количество прецедентов, удовлетворяющих ДП образа за единицу времени. Образы ранжируются исходя из общего критерия качества. Наиболее качественным будет считаться образ с наибольшим количеством актуальных прецедентов. Если количество прецедентов не увеличивается, данный образ постепенно будет отвергаться и при достижении критических отметок считаться не актуальным.

После завершения этапов формирования, начинается период жизненного цикла, на котором образ и связанная с ним гипотеза проходит проверку временем. Для этого необходимо оценить, насколько часто образ применяется при решении новых прецедентов и фиксируются ли новые прецеденты в том месте, где он был синтезирован.

Оценка эффекта использования предложенной модели. Рассмотрим пример прогнозирования АС на основе накопленной информации о прецедентах. Для анализа был выбран один из районов города Таганрога (рис. 2). На карту добавлены данные по дорожно-транспортным происшествиям с 2017 по 2023 гг. включительно. Общее количество прецедентов – 114. В качестве программного обеспечения использовался ArcGIS PRO.

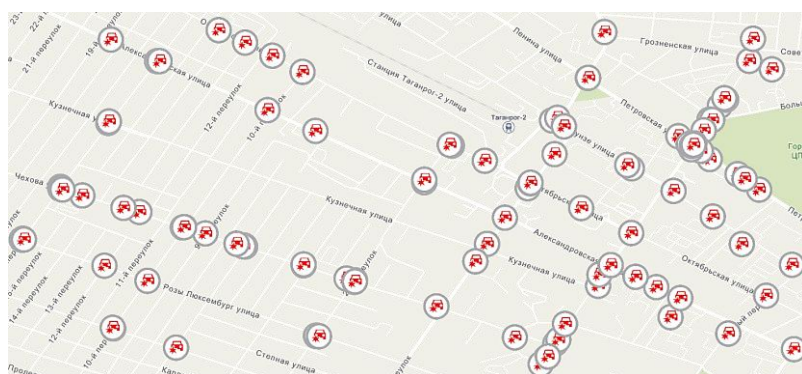


Рис. 2. Местоположения АС

Найдем места со схожим местоположением АС. Для этого воспользуемся инструментом «Кластеризация на основе плотности, алгоритм OPTICS (настройки: расстояние поиска – 50 м, минимальное количество объектов – 2)». В результате получим следующее распределение кластеров (рис. 3).

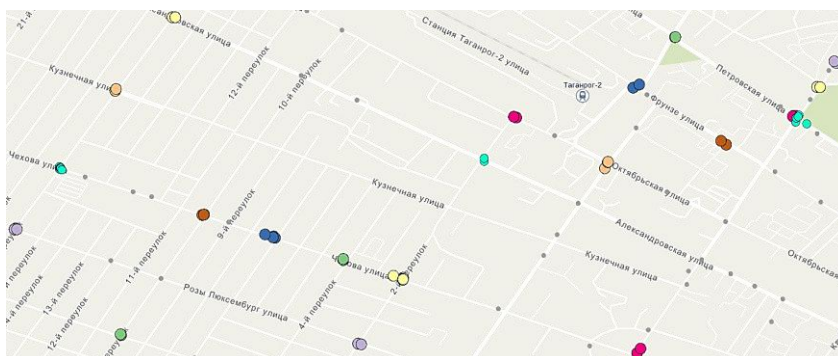


Рис. 3. Кластеры АС

Всего было построено 22 кластера, из них было синтезировано 16 образов. Прецеденты, которые не стали частью образа, составляют общую базу данных с образами. В результате формируется две базы данных. Первая содержит 114 прецедентов. Вторая

содержит 67 прецедентов и 16 синтезированных образов. Сравним эффективность прогнозирования с помощью первой и второй базы данных. В качестве метрики сходства прецедентов используем меру сходства по Хэммингу, т. е. близкими будем считать прецеденты или образы с наибольшим количеством общих характеристик.

$$S(C, T) = \frac{n_{ct}}{n},$$

где n_{ct} – число совпадающих признаков (параметров), n – общее количество параметров.

Описание прецедента АС представим в виде кортежа:

$$c = (TD, WD, RC, RD, RB, CR, PC, PI, RE, TA),$$

где TD – Время суток; WD – Погода; RC – Состояние дороги; RD – Недостатки УДС; RB – Жилые дома (ИЖС – Индивидуальная жилая застройка, МКД – Многоквартирный дом); CR – Перекрестки; PC – Пешеходные переходы (ПП); PI – Точки интереса; RE – прочие элементы дорожной сети, TA – тип аварии.

Тестовая выборка формировалась из прецедентов АС из других районов города Таганрога. Если характеристика отсутствовала, то на ее место ставилось сообщение «N». Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение ответов баз данных с тестовой выборкой

Описание прецедента из тестовой выборки	Ответы	
	Первая база данных	Вторая база данных
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "N", "ИЖС", "N", "Нерегулируемый ПП", "N", "N", "Наезд на пешехода"	Столкновение	Наезд на пешехода или Столкновение*
"Светлое", "Пасмурно", "Сухое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "ИЖС", "N", "Нерегулируемый ПП", "N", "N", "Столкновение"	Столкновение	Столкновение
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "N", "ИЖС", "N", "N", "N", "N", "Наезд на пешехода"	Столкновение	Столкновение
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "ИЖС", "Регулируемый перекресток", "Регулируемый ПП", "N", "N", "Столкновение"	Столкновение	Столкновение
"Темное", "Ясно", "Сухое", "N", "ИЖС", "N", "N", "N", "N", "Наезд на препятствие"	Наезд на велосипедиста	Наезд на велосипедиста
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "Отсутствие вертикальной разметки", "ИЖС", "Нерегулируемый перекресток неравнозначных дорог", "N", "N", "N", "Столкновение"	Столкновение	Столкновение
"Темное", "Ясно", "Сухое", "N", "ИЖС", "Регулируемый перекресток", "N", "N", "N", "Столкновение"	Столкновение	Столкновение
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "N", "МКД", "Нерегулируемый перекресток неравнозначных дорог", "N", "N", "N", "Столкновение"	Столкновение	Столкновение
"Темное", "Пасмурно", "Мокрое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "N", "Нерегулируемый перекресток неравнозначных дорог", "Нерегулируемый ПП", "N", "N", "Наезд на пешехода"	Наезд на пешехода	Наезд на пешехода

"Светлое", "Ясно", "Сухое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "N", "Нерегулируемый перекрёсток неравнозначных дорог", "Нерегулируемый ПП", "N", "N", "Наезд на пешехода"	Наезд на пешехода	Наезд на пешехода
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "МКД", "N", "N", "N", "N", "Наезд на пешехода"	Столкновение	Столкновения
"Светлое", "Пасмурно", "Мокрое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "ИЖС", "Регулируемый перекрёсток", "Регулируемый ПП", "N", "N", "Столкновение"	Наезд на пешехода	Столкновение

* в данной ситуации характеристики прецедента с одинаковой степенью сходства соответствовали образам с разными видами АС.

Таким образом, внедрение обобщений в базу данных позволило улучшить основные показатели эффективности анализа: средняя степень сходства увеличилась на 3% (с 0,90 до 0,93), среднее количество верных ответов увеличилось на 22% (с 0,58 до 0,71). Внедрение обобщений также позволило сократить общее количество элементов таблицы примерно на 37% (с 114 до 83 элементов).

Заключение. Использование образов позволяет эффективнее проводить рассуждения на основе прецедентов, что позволяет расширить диапазон допустимых значений при поиске похожей ситуации за счет обобщения отдельных прецедентов. Геоинформационная модель представления АС включает в себя обобщенное описание нескольких прецедентов на основе их общего местоположения. Под общим местоположением рассматривается зона концентрации всех прецедентов, которая может быть рассчитана с помощью инструментов пространственного анализа. Проведенный эксперимент использования пространственных обобщений демонстрирует следующие преимущества:

Во-первых, оптимизация объема базы данных для хранения информации о прецедентах. Обобщение позволяет представить информацию, накопленную из нескольких прецедентов в виде отдельных образов, что позволяет сократить объем данных за счет сокращения повторяющейся информации.

Во-вторых, повышение достоверности вывода решения за счет расширения диапазона допустимых значений. Отдельно взятый прецедент в сравнения с новой ситуацией потенциально может содержать различия в характеристиках из-за чего отсутствует уверенность в возможности повторно использовать его решение. Обобщение информации на основе общего местоположения прецедентов позволяет создать образ из нескольких ситуаций. И как показал проведенный эксперимент, если рассматривать все различия в характеристиках прецедентов как ДП ситуации, то можно улучшить показатели степени сходства прецедентов и точности прогноза.

Наконец, применение пространственных обобщений позволяет избежать необходимости использования экспертных знаний, так как процесс формирования наборов прецедентов происходит через анализ их местоположения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00182, <https://rscf.ru/project/25-21-00182/>, реализовано Южным федеральным университетом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Термины МЧС России – МЧС России. – URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/terminy-mchs-rossii> (дата обращения: 02.02.2025).
2. Бублей С.Е., Мамутов Б.В. Экспертный анализ непредвиденных ситуаций // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 5 (94). – С. 143-147.
3. Климова И.В., Сазанова Н.В., Махнёва А.Н. Опыт проведения технического расследования аварии на опасном производственном объекте нефтепродуктообеспечения // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 1 (46). – С. 93-102.

4. *Koo J., Kim S., Kim H., Kim Y. H., Yoon E.S.* A systematic approach towards accident analysis and prevention // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2009. – No. 26 (6). – P. 1476-1483.
5. *Грабелников А.С.* Сравнительный анализ существующих методик прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера // *Современные проблемы гражданской защиты*. – 2022. – № 1 (42). – С. 10-13.
6. *Yuqing W.* Research on the prediction of traffic accident by linear regression // *Theoretical and Natural Science*. – 2024. – Vol. 38 (1). – P. 39-44.
7. *Jiangnan X., Senzhang W., Xiang W., Min X., Kun X., Jiannong C.* Multi-view Bayesian spatio-temporal graph neural networks for reliable traffic flow prediction // *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. – 2022. – Vol. 15. – P. 1-14.
8. *Chengjiang X.* Application of Bayes Theorem to Accident Analysis and Classification // *Highlights in Science Engineering and Technology*. – 2023. – Vol. 47. – P. 46-57.
9. *Ткалич С.А., Бурковский А.В., Котов Д.В.* Исследование нейросетевой модели прогнозирования аварийных ситуаций процесса вулканизации // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2010. – Т. 6, № 7. – С. 15-19.
10. *Ogwueleka F., Misra S., Ogwueleka T.C., Fernandez-Sanz L.* An Artificial Neural Network Model for Road Accident Prediction: A Case Study of a Developing Country // *Acta Polytechnica Hungarica*. – 2014. – Vol. 11 (5). – P. 177-197.
11. *Богомолов А.С.* Анализ путей возникновения и предотвращения критических сочетаний событий в человекомашинных системах // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 219-230. – DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2017-17-2-219-230>.
12. *Le Yu, Jianjun L.* Stability of interbed for salt cavern gas storage in solution mining considering cusp displacement catastrophe theory // *Petroleum*. – 2015. – No. 1. – P. 82-90.
13. *Xuanqiang W., Shuyan C., Wenchang Z.* Traffic Incident Duration Prediction Based On Partial Least Squares Regression // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. – 2013. – Vol. 96. – P. 425-432.
14. *Носков С.И., Вергасов А.С.* Реализация взвешенного метода наименьших квадратов с использованием мер сходства // *Вестник науки и образования*. – 2018. – № 18-1 (54). – С. 29-32.
15. *Измаилова Э.А., Кузнецова Ю.А.* Метод мозгового штурма // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2013. – № 2 (6). – С. 32-35.
16. *Ковальский Ф.С., Мосолов А.С., Прус Ю.В.* Применение методов Дельфи и анализа иерархий при выборе приоритетного сценария развития аварийной ситуации на объекте защиты // *Техносферная безопасность*. – 2020. – № 3 (28). – С. 12-20.
17. *Ильин В.Н., Лепехин А.В.* Технология автоматизации структурно-параметрического синтеза на основе метода морфологического ящика // *Труды МАИ*. – 2011. – № 46. – С. 1-11.
18. *Richter M.M., Weber R.O.* Case-based reasoning: a textbook. – Heidelberg: Springer, 2013. – 546 p.
19. *Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю.* Система поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации техногенных ЧС на основе прецедентного подхода // *Технологии техносферной безопасности*. – 2013. – № 5 (51). – 13 с.
20. *Пальчевский Е.В., Антонов В.В., Родионова Л.Е., Кромина Л.А., Фахруллина А.Р.* Моделирование зон затопления на основе прогнозирования временных рядов и ГИС-технологий // *Компьютерная оптика*. – 2024. – Т. 48, № 6. – С. 913-923. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1418.
21. *Khan A.A., Hussain J.* Utilizing GIS and Machine Learning for Traffic Accident Prediction in Urban Environment // *Civil Engineering Journal*. – 2024. – Vol. 10 (6). – P. 1922-1935.
22. *Герштейн А.М.* Выявление участков повышенной опасности на дорогах Массачусетса в 2013–2018 годах // *Компьютерные инструменты в образовании*. – 2021. – № 1 (19). – С. 45-57.
23. *Беляков С.Л., Белякова М.Л., Савельева М.Н.* Прецедентный анализ образов в интеллектуальных геоинформационных системах // *Информационные технологии*. – 2013. – № 7. – С. 22-25.

REFERENCES

1. Термины МЧС России – МЧС России [Terms of the Ministry of Emergency Situations of Russia - Ministry of Emergency Situations of Russia]. Available at: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii> (accessed 02 February 2025).
2. *Bubley S.E., Mamutov B.V.* Ekspertnyy analiz nepredvidennykh situatsiy [Expert unforeseen situations analysis], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 5 (94), pp. 143-147.
3. *Klimova I.V., Sazanova N.V., Makhneva A.N.* Opyt provedeniya tekhnicheskogo rassledovaniya avarii na opasnom proizvodstvennom ob"ekte nefteproduktobespecheniya [The experience of accident investigation on hazardous production facility of oil products supply], *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity* [Modern Problems of Civil Protection], 2023, No. 1 (46), pp. 93-102.

4. Koo J., Kim S., Kim H., Kim Y. H., Yoon E.S. A systematic approach towards accident analysis and prevention, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2009, No. 26 (6), pp. 1476-1483.
5. Grabel'nikov A.S. Sravnitel'nyy analiz sushchestvuyushchikh metodik prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy tekhnogennoy kharaktera [Comparative analysis of existing techniques for forecasting man-made emergency situations], *Sovremennye problemy grazhdanskoй zashchity* [Modern Problems of Civil Protection], 2022, No. 1 (42), pp. 10-13.
6. Yuqing W. Research on the prediction of traffic accident by linear regression, *Theoretical and Natural Science*, 2024, Vol. 38 (1), pp. 39-44.
7. Jiangnan X., Senzhang W., Xiang W., Min X., Kun X., Jiannong C. Multi-view Bayesian spatio-temporal graph neural networks for reliable traffic flow prediction, *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2022, Vol. 15, pp. 1-14.
8. Chengjiang X. Application of Bayes Theorem to Accident Analysis and Classification, *Highlights in Science Engineering and Technology*, 2023, Vol. 47, pp. 46-57.
9. Tkachik S.A., Burkovskiy A.V., Kotov D.V. Issledovanie neyrosetvoy modeli prognozirovaniya avariynykh situatsiy protsessа vulkanizatsii [Research neuronet model of forecasting emergency situations of process vulcanization], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh state technical University], 2010, Vol. 6, No. 7, pp. 15-19.
10. Ogwueleka F., Misra S., Ogwueleka T.C., Fernandez-Sanz L. An Artificial Neural Network Model for Road Accident Prediction: A Case Study of a Developing Country, *Acta Polytechnica Hungarica*, 2014, Vol. 11 (5), pp. 177-197.
11. Bogomolov A.S. Analiz putey vozniknoveniya i predotvrashcheniya kriticheskikh sochetaniy sobytiy v chelovekomashinnykh sistemakh [Analysis of the ways of occurrence and prevention of critical combinations of events in man-machine systems], *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika* [Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics], 2017, Vol. 17, No. 2, pp. 219-230. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2017-17-2-219-230>.
12. Le Yu, Jianjun L. Stability of interbed for salt cavern gas storage in solution mining considering cusp displacement catastrophe theory, *Petroleum*, 2015, No. 1, pp. 82-90.
13. Xuanqiang W., Shuyan C., Wenchang Z. Traffic Incident Duration Prediction Based On Partial Least Squares Regression, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2013, Vol. 96, pp. 425-432.
14. Noskov S.I., Vergasov A.S. Realizatsiya vzveshennogo metoda naimen'shikh kvadratov s ispol'zovaniem mer skhodstva [Implementation of weighted least squares method using similarity measures], *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Science and Education], 2018, No. 18-1 (54), pp. 29-32.
15. Izmailova E.A., Kuznetsova Yu.A. Metod mozgovogo shturma [The method of brainstorming], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society], 2013, No. 2 (6), pp. 32-35.
16. Koval'skiy F.S., Mosolov A.S., Prus Yu.V. Primenenie metodov Del'fi i analiza ierarkhiy pri vybere prioriternogo stseneriya razvitiya avariynoy situatsii na ob'ekte zashchity [Application of methods of Delphi and analysis of hierarchies at the choice of the priority scenario of development of emergency situation at the protected object], *Tekhnosferная bezopasnost'* [Technosphere Safety], 2020, No. 3 (28), pp. 12-20.
17. Il'in V.N., Lepekhin A.V. Tekhnologiya avtomatizatsii strukturno-parametricheskogo sinteza na osnove metoda morfologicheskogo yashchika [Technology of automation of structural-parametric synthesis based on the morphological box method], *Trudy MAI* [Trudy MAI], 2011, No. 46, pp. 1-11.
18. Richter M.M., Weber R.O. Case-based reasoning: a textbook. Heidelberg: Springer, 2013, 546 p.
19. Berman A.F., Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I., Yurin A.Yu. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy po preduprezhdeniyu i likvidatsii tekhnogennykh ChS na osnove pretsedentnogo podkhoda [Decision support system for prevention and liquidation of technogenic emergency situations on basis of case-based approach], *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technosphere safety technologies], 2013, No. 5 (51), 13 p.
20. Pal'chevskiy E.V., Antonov V.V., Rodionova L.E., Kromina L.A., Fakhrullina A.R. Modelirovanie zon zatopeniya na osnove prognozirovaniya vremennykh ryadov i GIS-tekhnologii [Modeling flood zones on the basis of time series forecasting and GIS-technologies], *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2024, Vol. 48, No. 6, pp. 913-923. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1418.
21. Khan A.A., Hussain J. Utilizing GIS and Machine Learning for Traffic Accident Prediction in Urban Environment, *Civil Engineering Journal*, 2024, Vol. 10 (6), pp. 1922-1935.
22. Gershteyn A.M. Vyyavlenie uchastkov povyshennoy opasnosti na dorogakh Massachusetsa v 2013–2018 godakh [Hotspots of traffic accidents that cause injuries or death in Massachusetts from 2013 to 2018], *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii* [Computer Tools in Education], 2021, No. 1 (19), pp. 45-57.
23. Belyakov S.L., Belyakova M.L., Savel'eva M.N. Pretsedentnyy analiz obrazov v intellektual'nykh geoinformatsionnykh sistemakh [Geoinformation service of the situational center], *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2013, No. 7, pp. 22-25.

Беляков Станислав Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: sbelyakov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; д.т.н.; профессор.

Израилев Лев Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: izrailev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185608305; кафедра информационных измерительных технологий и систем; магистрант.

Belyakov Stanislav Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: sbelyakov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Information Analytical Systems of Safety; dr. of eng. sc.; professor.

Izrailev Lev Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: izrailev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185608305; the Department of Information Measurement Technologies and Systems; master's student.

УДК 621.317.3

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-164-175

А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВЕДЕННЫХ ТОКОВ МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ

Молниевый разряд (МР), проходящий в ракету-носитель (РН), сопровождается прямым ударом по корпусу и, возникающими внутри корпуса, электромагнитными полями. Последние воздействуют на протяженные кабельные линии (КЛ) и наводят в них токи и напряжения. Это может приводить к запуску цепей пиротехнических устройств РН, срабатывание которых носит критический характер для функционирования бортового оборудования и для ракеты в целом. Их нештатное иницирование может приводить к катастрофическим последствиям. Амплитудно-временные параметры наводимых электромагнитных полей (ЭМП) достигают значений сотен кВ/м по электрическому полю и сотен кА/м по магнитному полю. Создание моделирующего комплекса для получения ЭМП с такими характеристиками в объеме, сопоставимом с размерами РН, представляет собой чрезвычайно сложную техническую задачу. Целью исследований явилось обоснование приемлемого, практически реализуемого способа натурного моделирования наведенных токов. Задачами исследований стали оценка возможности генерации электромагнитного поля заданных параметров, расчетная оценка токов и напряжений, наводимых молниевыми разрядами в кабельных линиях РН, схемное решение для разрабатываемой установки. Электромагнитные процессы, протекающие в кабельных линиях при воздействии на них токов молниевых разрядов, рассчитывались на основе решений уравнений Максвелла. Кабельные линии моделировались эквивалентными схемами замещения. Проведенные исследования показали, что для оценки стойкости РН к воздействию ЭМП молниевых разрядов целесообразно использовать комбинированный, расчетно-экспериментальный метод, при котором на первом этапе расчетным способом определяются прогнозируемые реакции протяженных кабельных линий РН на воздействия молниевых разрядов, а на втором этапе оборудование и устройства, подключенные к КЛ, нагружаются рассчитанными импульсами тока (напряжения) с помощью высоковольтного стенда молниевых разрядов. Использование данного подхода позволяет существенно упростить требования к испытательному оборудованию генерации электромагнитных полей, что обеспечит, в конечном итоге, безопасное применение пиротехнических устройств на борту ракеты-носителя в условиях молниевой активности.

Наведенный ток; пиропатрон; высоковольтный стенд молниевых разрядов; генератор импульсных токов; кабельная линия; стол заземления высоковольтный.

A.A. Yakovlev, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy

SIMULATION OF LIGHTNING STRIKE INDUCED CURRENTS AT MISSILERY SAMPLES TESTING

The lightning strike (LS) to launch vehicle (LV) is accompanied by direct impact on the airframe and electromagnetic (EM) fields occurring inside the airframe. The EM fields influence the extended power lines (PL) and induce currents and voltages in them. In this case, pyrotechnic circuits of LV might be actuated and thus damage critically the operation of airborne equipment and the vehicle itself. Their off-nominal ignition may lead to a catastrophe. The amplitude-time parameters of induced EM fields reach hundreds of kV/m and kA/m for electric and magnetic fields respectively. Constructing a simulation facility that is capable to produce EM fields with similar properties and size comparative to that of the LV becomes a tough technical challenge. The purpose of the research was to substantiate an acceptable, practi-

cally feasible method of full-scale modeling of induced currents. The research objectives were to evaluate the possibility of generating an electromagnetic field of specified parameters, to estimate the currents and voltages induced by lightning discharges in the PH cable lines, and to design a circuit solution for the installation under development. The electromagnetic processes occurring in cable lines when exposed to lightning discharge currents were calculated based on solutions to Maxwell's equations. The cable lines were modeled by equivalent substitution schemes. In this regard, it is considered reasonable to use a combined method of evaluation of LV tolerance to the impact of EM fields caused by lightning strikes; the method is meant to combine both calculation and experimental techniques. At the first stage, the expected response of extended power lines to EM fields is calculated, and the second stage implies loading the power line consumers with estimated current (voltage) pulses provided by high voltage test bench for lightning strike simulation. The use of this approach makes it possible to significantly simplify the requirements for test equipment for generating electromagnetic fields, which will ultimately ensure the safe use of pyrotechnic devices on board a launch vehicle in conditions of lightning activity.

Induced current; squib; high voltage test bench for lightning strike simulation; pulse current generator; power line; high-voltage grounding board.

Введение. Типовая компоновка РН предполагает, что полезная нагрузка располагается в его третьей ступени и защищена головным обтекателем. Как показывает опыт применения [1–8], именно головной обтекатель является наиболее поражаемым элементом конструкции РН при ударе МР. Под обтекателем проходят трассы бортового оборудования, в том числе управления пиропатронами.

Современная конструкция РН включает свыше двухсот пиропатронов (ПП), расположенных на всех трех ступенях. Наличие ПП является основной отличительной особенностью РН от образцов авиационной техники. Под кабельными линиями объекта, подверженными воздействию тока молнии, в данном случае рассматриваются кабельные линии цепей запуска пиротехнических устройств РН.

Таким образом, испытанию электромагнитным полем предстоит подвергать электрические контуры, расположенные внутри корпуса ракеты-носителя, в том числе контуры, содержащие ПП. Такие испытания должны предусматривать размещение кабельных жил, приборов и ПП (или их имитаторов) в изменяющемся электромагнитном поле, наводящем в электрических цепях ЭДС самоиндукции, которое в свою очередь создает наведенные токи в оболочках и жилах кабельных сетей. Наиболее ответственным моментом данного вида испытаний является фиксация величины тока, протекающего через нагревательные элементы ПП. Величина тока протекания не должна превосходить величины, гарантирующей несрабатывание ПП от наведенного тока. Предписываемая форма импульса магнитного поля показана на рис. 1. Кроме этого тестовый импульсный ток молнии, заданный требованиями руководящих документов [9–12], характеризуется малой длительностью времени фронта, одновременно с очень большим значением амплитуды импульса. При этом длительность импульса тока достигает значительной величины. Вследствие этого практически невозможно проведение прямых испытаний РН на стойкость к воздействию ЭМП, генерируемых молниевыми разрядами.

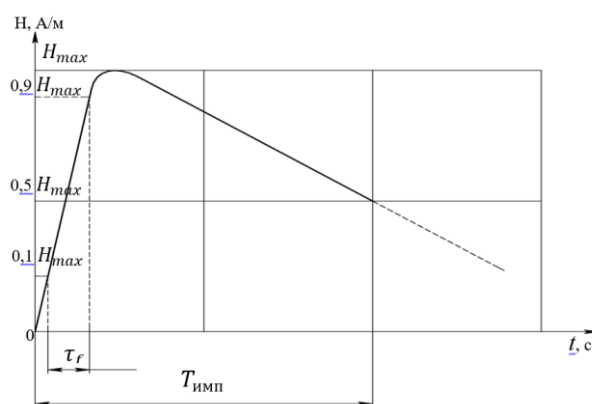


Рис. 1. Форма импульса магнитного поля

Оценка возможности генерации электромагнитного поля заданных параметров.

Проектирование оборудования для данного вида испытаний имеет следующие особенности:

- ♦ магнитное поле должно создаваться в объеме, достаточном для размещения испытываемых электрических контуров или их элементов;
- ♦ магнитное поле желательно иметь максимально равномерным по объему, в котором размещаются испытываемые электрические контуры;
- ♦ оборудование должно быть в максимальной мере унифицировано с оборудованием для испытаний электрическим полем;
- ♦ направление вектора магнитной индукции должно быть перпендикулярно направлению вектора напряженности электрического поля;
- ♦ приспособление для создания магнитного поля должно иметь минимальную индуктивность, так как только в этом случае можно приблизиться к требуемым параметрам.

Для создания магнитного поля предполагается использовать стол заземления высоковольтный (СЗВ) [13, 14], с подключением его пластин к генератору импульсного тока (ГИТ) [15–17].

При пропускании импульса тока по пластинам стола (рис. 2), между пластинами создается квазиравномерное магнитное поле, пропорциональное протекающим по пластинам току.

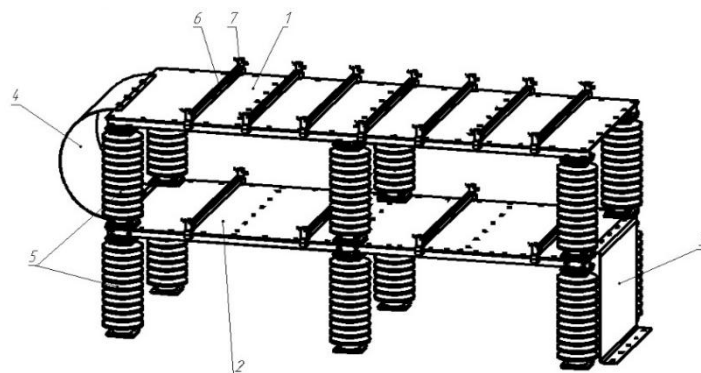


Рис. 2. Стол заземления высоковольтный: 1 – основание верхнее; 2 – основание нижнее; 3 – лист заземляющий; 4 – лист переходной; 5 – амортизаторы; 6 – направляющая шина; 7 – винт

Схема расчета магнитного поля между параллельными пластинами стола приведена на рис. 3.

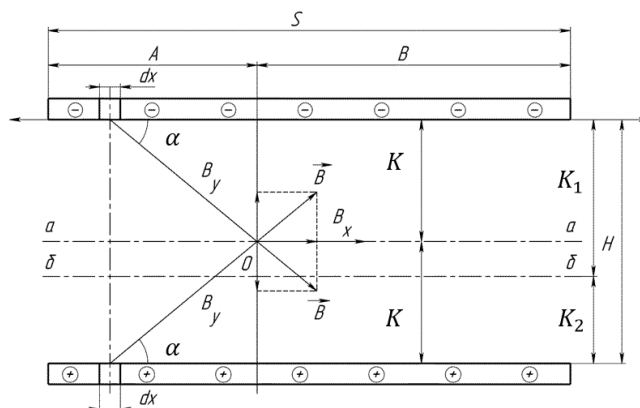


Рис. 3. Схема расчета магнитного поля между пластинами стола

Линия симметрии а-а характерна тем, что на ней вертикальные составляющая векторов магнитной индукции, создаваемые верхней и нижней пластиной, взаимно уничтожаются и имеет место только горизонтальная составляющая, которую в точке 0 можно определить по следующей зависимости [18]

$$dB = 2 \cdot \frac{\mu_0 I_0}{2\pi S r} \sin \alpha dx = \frac{\mu_0 I_0 K}{\pi S r^2} = \frac{\mu_0 I_0 K dx}{\pi S (X^2 + K^2)}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м; S – ширина пластины; r – расстояние от расчетной точки до проводника; $K_1 = K_2 = K$ – полученное выражение.

После интегрирования в обе стороны от проекции точки 0 на пластины по координате X выражение для вектора магнитной индукции в данной точке линии а-а имеет вид:

$$B = \frac{\mu_0 I_0 K}{\pi S} \int_0^A \frac{dx}{(X^2 + K^2)} + \frac{\mu_0 I_0 K}{\pi S} \int_0^B \frac{dx}{(X^2 + K^2)} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi S} \left(2 \arctg \frac{A}{K} + 2 \arctg \frac{B}{K} \right). \quad (2)$$

Величина магнитной индукции непостоянна и является функцией геометрического параметра равного

$$\Gamma = \arctg \frac{A}{K} + \arctg \frac{B}{K}. \quad (3)$$

Аналогичный расчет для значения горизонтальной составляющей вектора магнитной индукции для точек, лежащих на линии б-б произведен по выражению:

$$B = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi S} \left(\arctg \frac{A}{K_1} + \arctg \frac{B}{K_1} + \arctg \frac{A}{K_2} + \arctg \frac{B}{K_2} \right). \quad (4)$$

Геометрический параметр Γ в этом случае равен

$$\Gamma = \arctg \frac{A}{K_1} + \arctg \frac{B}{K_1} + \arctg \frac{A}{K_2} + \arctg \frac{B}{K_2}. \quad (5)$$

Результаты расчета в относительных величинах ширины пластины стола для параметров $K_1 = 0,2$, $K_2 = 0,4$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры пластин для стола заземления высоковольтного

A	B	$\arctg \frac{A}{K_1}$	$\arctg \frac{B}{K_1}$	$\arctg \frac{A}{K_2}$	$\arctg \frac{B}{K_2}$	Γ
1,0	0,0	1,19	0	1,37	0	2,56
0,9	0,1	1,15	0,24	1,35	0,46	3,20
0,8	0,2	1,11	0,46	1,33	0,79	3,69
0,7	0,3	1,05	0,64	1,29	0,98	3,96
0,6	0,4	0,98	0,79	1,25	1,11	4,13
0,5	0,5	0,90	0,90	1,19	1,19	4,18

Профили значений вектора магнитной индукции в безразмерных величинах для линии а-а и б-б, приведены на рис. 4.

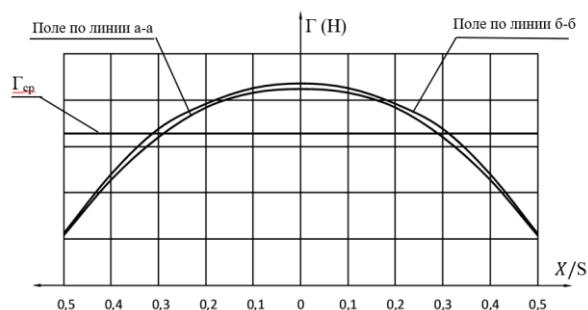


Рис. 4. Изменение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля по плоскости параллельной пластинам (в поперечном сечении)

Приведенные оценочные расчеты позволяют сделать следующие выводы.

Напряженность магнитного поля между пластинами стола заземляющего может быть оценена по зависимости

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi S} \Gamma, \quad (6)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость среды, для воздуха $\mu = 1$.

Потребный максимальный ток, который должен быть пропущен через пластины СЗВ, соответственно может быть определен по зависимости [19]

$$I_0 = \frac{H 2\pi S}{\Gamma_{\text{ср}}}, \quad (7)$$

где $\Gamma_{\text{ср}}$ – назначенное среднее значение геометрического параметра.

Располагать испытываемый контур целесообразно в средней плоскости между пластинами, где магнитное поле в наименьшей степени искажено вертикальной составляющей магнитной индукции.

При использовании в качестве средства генерации электромагнитного поля стола заземления высоковольтного, квазиравномерное электрическое поле может быть организовано между его пластинами по аналогии с полем плоского конденсатора.

Расчет параметров электрического контура, обеспечивающего заданные характеристики магнитного поля между пластинами стола заземления, для исходных данных $E = 5 \cdot 10^5$ В/м, $H = 2,5 \cdot 10^3$ А/м, $L = 4$ мкГн, геометрическая характеристика $\Gamma = 3,6$, $S = 3$ м² – площадь пластин, $d = 0,6$ м, $\tau_f = 16,1$ мкс, $T = 1 \cdot 10^{-4}$ с дал следующие результаты:

напряжение зарядки конденсаторной батареи $U_0 = E_0 \cdot d = 5 \cdot 10^6 \cdot 0,6 = 3 \cdot 10^5$ В;

амплитуда тока $I_0 = \frac{2\pi H_0}{\Gamma} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{3,6} = 5\,233$ А;

емкость стола заземления $C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot \frac{3}{0,6} = 44,25 \cdot 10^{-12}$ Ф,

нагрузочное сопротивление $R_h = \frac{U_0}{I_0} = \frac{3 \cdot 10^5}{5233} = 57,4$ Ом.

потребная емкость конденсаторной батареи $C = -\frac{t}{R \ln 0,5} = \frac{10^{-4}}{57,4 \cdot 0,693} = 2,5$ мкФ.

Полученные результаты расчета показывают, что источник питания должен иметь напряжение не менее 300 кВ, то есть необходимо применение генератора импульсного напряжения (ГИН). При использовании в составе высоковольтного стенда молниевых разряда ГИН-800 [20], он может применяться для создания электромагнитного поля, но не удовлетворяет по располагаемой емкости конденсаторной батареи равной 0,25 мкФ, при этом имеет избыточное значение по напряжению.

Практическая реализация испытаний бортового оборудования путем генерации реальных электромагнитных полей с параметрами, указанными выше сопряжена со значительными научно-техническими проблемами, к которым можно отнести:

- ♦ регистрацию фактических величин сильных электромагнитных полей при проведении испытаний;
- ♦ обеспечение замеров наведенных токов в имитаторах ПП в условиях сильных помех;
- ♦ обеспечение стойкости нагрузочных сопротивлений, воспринимающих мощный токовый импульс;
- ♦ создание ГИН, работающего в двух различных режимах.

Решение указанных проблем является проблематичным, в связи с чем предлагается применить расчетный метод, позволяющей перейти от непосредственного воздействия электромагнитного поля, вызываемого МР, к наведенным токам, генерируемым в электрических контурах РН.

Расчетная оценка токов и напряжений, наводимых молниевыми разрядами в кабельных линиях РН. Для расчета амплитудно-временных параметров токов и напряжений, наводимых молниевыми разрядами в кабельных линиях, проложенных в корпусе

РН, необходимо определить их электрофизические характеристики. Кабельные линии, представляют собой электротехнические изделия, состоящие из проводных электрических цепей. В них необходимо рассматривать параметры цепей – «защитная оплетка кабеля (далее по тексту – экран) – металлоконструкции объекта (далее по тексту – корпус)», «жила – корпус» и «жила – экран».

Электромагнитные процессы, протекающие в кабельных линиях при воздействии на них токов молниевых разрядов, могут быть рассчитаны на основе решений уравнений Максвелла или телеграфных уравнений, являющихся следствием уравнений электродинамики.

$$\begin{cases} -\frac{\partial U_1}{\partial x} = R_1 I_1 + L_1 \frac{\partial I_1}{\partial t} + M \frac{\partial I_2}{\partial t} - E(x, t), \\ -\frac{\partial U_2}{\partial x} = R_2 I_2 + L_2 \frac{\partial I_2}{\partial t} + M \frac{\partial I_1}{\partial t} - E(x, t), \\ -\frac{\partial I_1}{\partial x} = G_{12}(U_1 - U_2) + C_{12} \frac{\partial (U_1 - U_2)}{\partial t}, \\ -\frac{\partial I_2}{\partial x} = G_{12}(U_2 - U_1) + C_{12} \frac{\partial (U_2 - U_1)}{\partial t} + G_2 U_2 + C_2 \frac{\partial U_2}{\partial t}, \end{cases} \quad (8)$$

где I_1, I_2 – токи в жилах и металлопокровах; U_1 – напряжения в цепях «жила – корпус» и «металлопокровы – корпус»; E – ЭДС, моделирующая поля разряда молнии по длине линии или токов молнии в области контакта канала молнии с корпусом РН; R_1, R_2 – погонные сопротивления жил и металлопокровов; L_1, L_2 – погонные индуктивности жил и защитных экранов; C_{12}, G_{12}, C_2, G_2 – погонные емкости и проводимости цепей «жила – металлопокровы» и «металлопокровы – корпус».

Схема замещения кабельных линий при воздействии полей приведена на рис. 5.

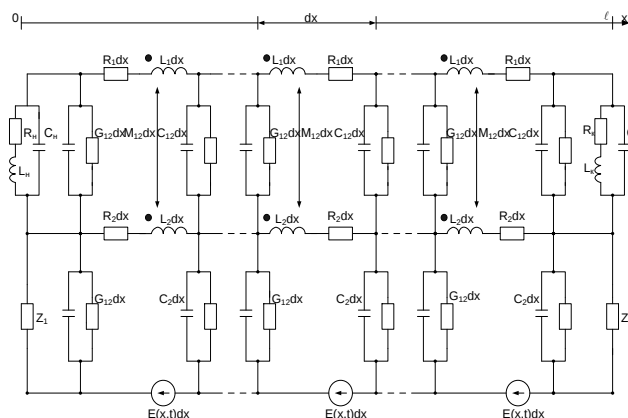


Рис. 5. Схема замещения кабельной линии, подверженной воздействию полей молниевых разрядов

В ней кабельные линии представляются как трехпроводные линии, состоящие из цепей «жила – корпус», «жила – металлопокровы» и «металлопокровы – корпус», а поля моделируются несколькими источниками ЭДС, которые распределяются по всей длине линии.

Решение системы уравнений (8) применительно к воздействиям молниевых разрядов производится во временной постановке, вследствие того, что электрофизические характеристики кабельных линий слабо зависят от спектра частот указанных воздействий. Максимальные величины токов и напряжений могут наводиться при условии прокладки КЛ вдоль корпуса РН (максимальное воздействие тока молнии). Длина КЛ принималась наибольшей из проложенных в РН и равной 28 м.

При расчете токов, наводимых в оплетке КЛ, учитывалось, что оплетка по концам соединена с корпусом РН. При расчете максимально возможных напряжений между оплеткой и корпусом РН принималось, что оплетка с одной стороны замкнута на корпус РН, а с другой – разомкнута.

Анализ результатов расчетов токов и напряжений, наводимых токами молнии в кабельных линиях объекта, показывает, что на оплетку КЛ цепей запуска пиротехнических устройств могут затекать токи амплитудой до 10А с длительностями импульсов до 100мкс и фронтом 1,5мкс (рис. 6), а также наводиться напряжения между оплеткой и корпусом с амплитудами до 2,1 В с длительностями импульсов до 100мкс и фронтом 0,5мкс.

В интересах придания стенду универсальности следует учитывать не только различия в параметрах объектов испытаний, но и предусмотреть необходимость определения фактических параметров импульсного тока, вызывающих срабатывание пиропатронов. В этой связи, при разработке технических решений по проектированию испытательной установки, предусмотрена возможность регулирования амплитуды импульсного тока в пределах от 10 до 100 А.

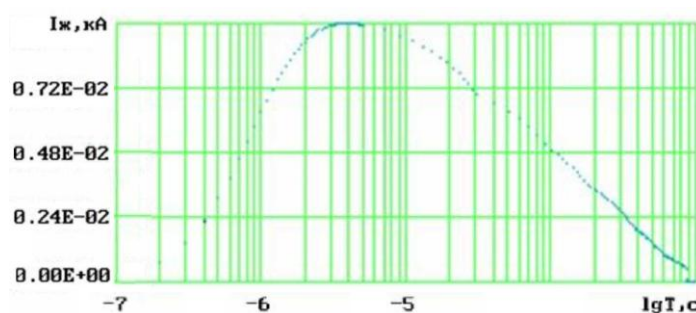


Рис. 6. Амплитудно-временная зависимость импульса тока, наводимого во внешней оплетке КЛ

Схемное решение для разрабатываемой установки. Испытательную установку предлагается создавать по принципу генератора импульсных токов на основе емкостного накопителя энергии (рис. 7).

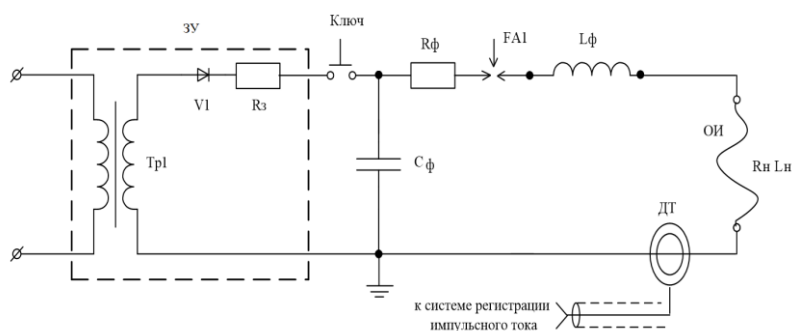


Рис. 7. Упрощенная принципиальная схема испытательной установки: ЗУ – зарядное устройство; Tr1 – трансформатор; V1 – вентиль высоковольтный; Rз – защитный резистор; Ключ – коммутатор подключения зарядного устройства к схеме; Cф – блок формирующий импульсных конденсаторов емкостного накопителя энергии; Rф – формирующий резистор; FA1 – управляемый коммутатор; Lф – формирующая индуктивность; ДТ – измерительный датчик тока; ОИ – объект испытаний

Был выполнен расчет параметров элементов схемы для апериодических процессов при 8 вариантах компоновки (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета параметров элементов схемы испытательной установки

№	C, мкФ	L, мкГн	R, Ом	U _c , В	I _{max} , А	τ _ф , мкс	τ _{0,5} , мкс
1	10,0	8,075 + 19,6	13,92 + 1,9	1419	86,28	4,25	118,00
2	5,0	16,150 + 19,6	27,85 + 1,9	2839	94,46	2,99	109,00
3	4,0	20,190 + 19,6	34,82 + 1,9	3548	93,82	2,71	107,70
4	3,0	26,920 + 19,6	46,43 + 1,9	4731	95,27	2,43	108,80
5	2,0	40,380 + 19,6	69,64 + 1,9	7097	96,78	2,13	103,90
6	1,0	80,760 + 19,6	139,29 + 1,9	14194	98,35	1,82	102,00
7	0,8	100,950 + 19,6	174,11 + 1,9	17743	98,68	1,76	101,60
8	0,6	134,600 + 19,6	232,10 + 1,9	23657	99,02	1,69	101,18

Анализ результатов расчета позволяет выбрать наиболее целесообразные варианты параметров элементов испытательной установки с точки зрения практической реализации схемных и конструктивных решений и показывает, что наиболее критичным параметром разрабатываемого ГИТ является его внутренняя индуктивность. Для исключения влияния на амплитудно-временные параметры импульсного тока, моделируемого установкой, необходимо обеспечить существенное превышение индуктивности ГИТ над индуктивностью объекта испытания. Поэтому наиболее приемлемым представляется вариант 5. Графическое отображение токового импульса для этого варианта приведено на рис. 8 и 9.

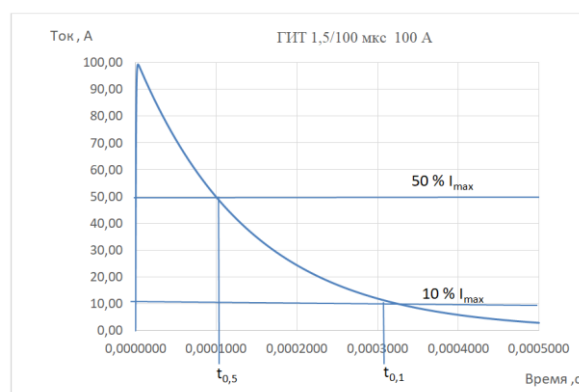


Рис. 8. Расчетная кривая импульсного тока; полная длительность импульса

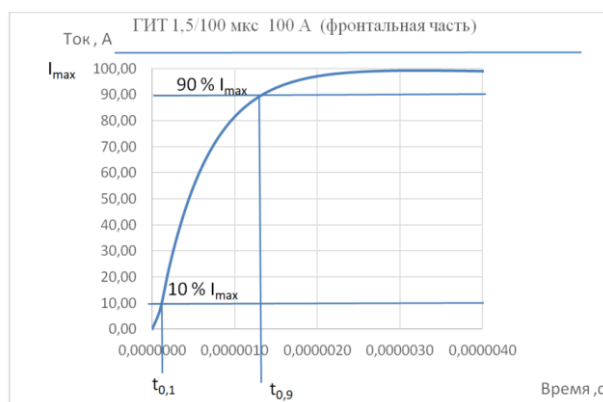


Рис. 9. Расчетная кривая импульсного тока; время нарастания фронта импульса

Конструктивное исполнение генератора ГИТ-ЭМП. Генератор импульсного тока электромагнитных полей расположен в низковольтной части стенда [21, 22] (рис. 10,а). В состав конструкции генератора импульсного тока для моделирования импульсного тока, наводимого при разрядах молнии в корпус РН в оболочках кабельных линий, входят следующие элементы: зарядное устройство; емкостной накопитель энергии (ЕНЭ); управляемый коммутатор; блок управления и измерения. Исполнение ГИТ-ЭМП имеет моноблочную конструкцию (рис. 10,б). Все элементы ГИТ размещены внутри корпуса стандартного металлического шкафа шириной 19". Зарядное устройство, емкостной накопитель энергии и управляемый коммутатор размещены на несущей конструкции из изоляционного материала, имеющего соответствующую диэлектрическую прочность.

Блок управления и измерения отделен от силовой части установки металлическим экраном, обеспечивающим снижение уровня помех, наводимых в цепях блока управления и измерения.

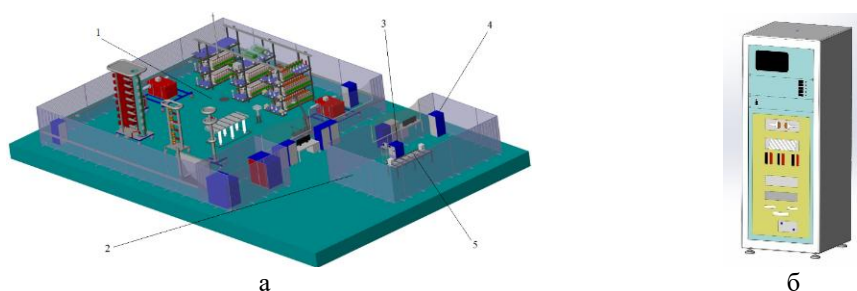


Рис. 10. Высоковольтный стенд молниевых разрядов: 1 – зона высоковольтных испытаний; 2 – зона низковольтных испытаний; 3 – AVI-3000; 4 – ГИТ-ЭМП; 5 – стол заземления высоковольтный

Зарядное устройство предназначено для заряда ЕНЭ и представляет собой высоковольтный трансформатор с выпрямителем и устройствами коммутации и заземления. Блок формирования предназначен для формирования амплитудно-временных параметров импульсов тока. Конструктивно, блок формирования представляет собой сборку из низкоиндуктивных резисторов объемного типа и высоковольтной катушки индуктивности. Управляемый коммутатор предназначен для управления разрядом ЕНЭ и представляет собой закрытый искровой разрядник тригatronного типа. Блок управления и измерения предназначен для контроля заряда и управления работой элементов ГИТ, а также для измерения и регистрации импульсного тока при проведении испытаний. В состав измерительной части блока управления входят измерительный импульсный трансформатор тока, цифровой запоминающий осциллограф, измерительные и информационные кабели.

Выводы:

1. В работе обоснован комбинированный расчетно-экспериментальный метод генерации наводимых в протяженных кабельных линиях токов и напряжений от электромагнитных полей молниевых разрядов. Исследования показали, что путь прямой имитации наведенных параметров приводит к необходимости применения генератора импульсного напряжения до 300 кВ. Готовый генератор типа ГИН-800 теоретически может быть применен, однако переразмерен по напряжению и не удовлетворяет по значению емкости конденсаторной батареи.

2. Рассчитаны необходимые параметры испытательной установки на базе разновидности ГИТ, семейство которых, во-первых, разработано в предыдущих работах и имеет типовую компонентную базу, а во-вторых, должен обеспечивать параметры, технически реализуемые на практике. Это напряжение зарядки конденсаторной батареи $U_0 = 3 \cdot 10^5$ В; амплитуда тока $I_0 = 5$ кА; емкость стола заземления $C = 50$ пФ, нагрузочное сопротивление $R_n = 58$ Ом, потребная емкость конденсаторной батареи $C = 2,5$ мкФ. Моделирование

различных вариантов параметров элементов испытательной установки позволило выбрать оптимальный вариант, обеспечивающий заданные значения фронта нарастания импульсного тока и его длительности.

3. Вновь создаваемый ГИТ-ЭМП встраивается в общую компоновку испытательного комплекса – высоковольтного стенда молниевых разрядов, работы по созданию которого находятся в завершающей фазе. Дальнейшие усилия целесообразно сосредоточить на разработке программ и методик испытаний, проведению натурных испытаний с использованием ГИТ-ЭМП и интерпретации результатов по оценке правильности принятых решений на теоретическом уровне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обработка и анализ случаев поражения самолетов гражданской авиации разрядами атмосферного электричества. Отчет о НИР № ГР80059418, Инв. № Б887910. – Рига: ГосНИИ ЭР АТ ГА, 1980. – 88 с.
2. *Uman M.A.* Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards // *Proceedings of the IEEE*. – 1988. – Vol. 76, No. 12. – P. 1548-1565. – DOI: 10.1109/5.16349.
3. *Phillpoy J.* Lightning strike // *Flight International*. – 1972. – No. 3316. – P. 114-156.
4. *Plumer J.A., Perry B.L.* An Analysis of Lightning strikes in Airline Operation in the USA and Europe // *Conference on Lightning and static Electricity, England, April 14-17, 1975*. – P. 502-513.
5. *Aufbauer H.* Atmosphärische Entladungen auf Luftfahrzeuge // *Electrotechn und Maschinenbau*. – 1978. – No. 9. – P. 417-421.
6. *Scully Robert.* Lightning Protection for the Orion Space Vehicle NASA: Johnson Space Centre. Houston, Texas. – 77058-3696. – (Professional English). – Text: direct, 10 p.
7. *Bachelier E., Issac F., Quenum W., Enjabert V., Mohedano L.* Lightning Protection of SOYUZ and VEGA launching pads // *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria*. – 6 p.
8. Молния ударила в ракету «Союз» при старте с Плесецка. 27 мая 2019. – URL: <https://tass.ru/proisshestiya/6475178> (дата обращения 18.01.2021).
9. КТ-160D. Квалификационные требования РФ. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. – М.: Госстандарт РФ, 2004.
10. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – P. 1-56.
11. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – P. 1-145.
12. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
13. *Яковлев А.А., Серов М.Ю., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Моделирование электрических характеристик разрядного контура высоковольтного стенда молниевых разрядов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 3 (239). – С. 252-265.
14. *Яковлев А.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Стендовое обеспечение испытаний изделий ракетно-космической техники искусственным молниевым разрядом и настройка параметров оборудования // *Тр. «НПЦАП». Системы и приборы управления*. – 2024. – № 2 (68). – С. 46-59.
15. *Бурлуцкий С.Г., Голосий А.С., Ковалев А.П., Сахабудинов Р.В.* Оценивание характеристик токовых генераторов имитации молниевых разрядов // *Тр. ВКА им. А.Ф.Можайского*. – 2022. – Вып. 682. – С. 171-182.
16. *Шишков Д.В., Яковлев А.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Расчет параметров токовых импульсов в разрядных контурах высоковольтного стенда молниевых разрядов // *Сб. материалов научно-технической конференции «Моделирование параметров атмосферы при применении систем вооружения»*. – Королев: ФГБУ «4 ЦНИИ» Минобороны России, 2022. – С. 47-51.
17. *Серов М.Ю., Яковлев А.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Параметрический анализ результатов расчета испытательных импульсов в эквивалентных контурах ГИТ-А, ГИТ-Д, ГИТ-ВС // *Сб. докладов ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А.Гагарина»*, 23-25 ноября 2022. – С. 222-226.
18. *Баранов М.И.* Избранные вопросы электрофизики: монография. В 3 т. Т. 2. Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Точка, 2010. – 407 с.
19. *Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И.* Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 223 с.

20. Система испытания импульсным напряжением ГИН-800кВ/80кДж. ТУ-ЦАЕИ-010217ГИН. – ООО «НПП «Электромаш». – Новочеркасск, 2019.
21. Овчинникова Н.А., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С. Создание стендов моделирования прямого и косвенного воздействия молниевых разрядов на элементы ракетно-космической техники // Сб. докладов Пятой Международной научной конференции «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии», 4-20 апреля 2024. – СПб.: ГУАП, 2024. – С. 111-115.
22. Патент на изобретение №2834247. Высоковольтный стенд молниевых разрядов и способ испытаний на воздействие молний / Голосий А.С., Самаркин А.Л., Сахабудинов Р.В., Торицын И.В., Яковлев А.А. Приоритет изобретения 10 июля 2024 г.

REFERENCES

1. Obrabotka i analiz sluchaev porazheniya samoletov grazhdanskoy aviatsii razryadami atmosfernogo elektrichestva. Otchet o NIR № GR80059418, Inv. № B887910 [Processing and analysis of cases of civil aviation aircraft damage by atmospheric electricity discharges. Research report No. GR80059418, Inv. No. B887910]. Riga. GosNII ER AT GA, 1980, 88 p.
2. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards, *Proceedings of the IEEE*, 1988, Vol. 76, No. 12, pp. 1548-1565. DOI: 10.1109/5.16349.
3. Phillpoy J. Lightning strike, *Flight International*, 1972, No. 3316, pp. 114-156.
4. Plumer J.A., Perry B.L. An Analysis of Lightning strikes in Airline Operation in the USA and Europe, *Conference on Lightning and static Electricity, England, April 14-17, 1975*, pp. 502-513.
5. Aufbauer H. Atmosphärische Entladungen auf Luftfahrzeuge, *Electrotechn und Maschinenbau*, 1978, No. 9, pp. 417-421.
6. Scully Robert. Lightning Protection for the Orion Space Vehicle NASA: Johnson Space Centre. Houston, Texas. 77058-3696. (Professional English). Text: direct, 10 p.
7. Bachelier E., Issac F., Quenum W., Enjabert V., Mohedano L. Lightning Protection of SOYUZ and VEGA launching pads, *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria*, 6 p.
8. Molniya udarila v raketu «Soyuz» pri startе s Plesetska. 27 maya 2019 [Lightning strikes Soyuz rocket during launch from Plesetsk. May 27, 2019]. Available at: <https://tass.ru/proisshestiya/6475178> (accessed 18 January 2021).
9. KT-160D. Kvalifikatsionnye trebovaniya RF. Usloviya ekspluatatsii i okruzhayushchey sredy dlya bortovogo aviatsionnogo oborudovaniya. Trebovaniya, normy i metody ispytaniy [KT-160D. Qualification requirements of the Russian Federation. Operating and environmental conditions for onboard aviation equipment. Requirements, standards and test methods]. Moscow: Gos-standart RF, 2004.
10. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013, pp. 1-56.
11. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013, pp. 1-145.
12. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
13. Yakovlev A.A., Serov M.Yu., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Modelirovanie elektricheskikh kharakteristik razryadnogo kontura vysokovol'tnogo stenda molnievogo razryada [Modeling of electrical characteristics of the discharge circuit of a high-voltage lightning discharge stand], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3 (239), pp. 252-265.
14. Yakovlev A.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Stendovoe obespechenie ispytaniy izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki iskusstvennym molnievym razryadom i nastroyka parametrov oborudovaniya [Stand support for testing rocket and space technology products with an artificial lightning discharge and setting up equipment parameters], *Tr. «NPTSAP». Sistemy i pribory upravleniya* [Proceedings of the Scientific and Practical Center of Aerospace Engineering. Control systems and devices], 2024, No. 2 (68), pp. 46-59.
15. Burlutskiy S.G., Golosiy A.S., Kovalev A.P., Sakhabudinov R.V. Otsenivanie kharakteristik toko-vykh generatorov imitatsii molnievykh razryadov [Evaluation of characteristics of current generators for simulating lightning discharges], *Tr. VKA im. A.F.Mozhayskogo* [Proceedings of the A.F. Mozhaysky Military Space Academy], 2022, Issue. 682, pp. 171-182.
16. Shishkov D.V., Yakovlev A.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Raschet parametrov tokovykh impul'sov v razryadnykh konturakh vysokovol'tnogo stenda molnievogo razryada [Calculation of parameters of current pulses in discharge circuits of a high-voltage lightning discharge stand], *Sb. materialov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie parametrov atmosfery pri primeneniі sistem vooruzheniya»* [Collection of materials of the scientific and technical conference "Modeling of atmospheric parameters when using weapons systems"]. Korolev: FGBU «4 TSNII» Minoborony Rossii, 2022, pp. 47-51.

17. Serov M.Yu., Yakovlev A.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Parametricheskii analiz rezul'tatov rascheta ispytatel'nykh impul'sov v ekvivalentnykh konturakh GIT-A, GIT-D, GIT-VS [Parametric analysis of the results of calculating test pulses in the equivalent circuits of GIT-A, GIT-D, GIT-VS], *Sb. dokladov VUNTS VVS «VVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina», 23-25 noyabrya 2022* [Collection of reports of the Military Scientific Center of the Air Force "VVA named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", November 23-25, 2022], pp. 222-226.
18. Baranov M.I. Izbrannyye voprosy elektrofiziki: monografiya [Selected issues of electrophysics: monograph], *In 3 Vol. 2. Book 2 Teoriya elektrofizicheskikh effektiv i zadach* [Theory of electrophysical effects and problems] [Theory of electrophysical effects and problems]. Khar'kov: Tochka, 2010, 407 p.
19. Bazelyan E.M., Gorin B.N., Levitov V.I. Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashchity [Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashchity]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 223 p.
20. Sistema ispytaniya impul'snym napryazheniem GIN-800kV/80kDzh. TU-TSAEI-010217GIN. OOO «NPP «Elektromash» [GIN-800 kV/80 kJ impulse voltage testing system. TU-CAEI-010217GIN]. Novocherkassk, 2019.
21. Ovchinnikova N.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Sozdanie stendov modelirovaniya pryamogo i nepryamogo vozdeystviya molnievogo razryada na elementy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Creation of stands for simulating direct and indirect impact of lightning discharge on elements of rocket and space technology], *Sb. dokladov Pyatoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Aerokosmicheskoe priborostroenie i ekspluatatsionnye tekhnologii», 4-20 aprelya 2024* [Collection of reports of the Fifth International Scientific Conference "Aerospace Instrumentation and Operational Technologies", April 4-20, 2024]. Saint Petersburg: GUAP, 2024, pp. 111-115.
22. Golosiy A.S., Samarkin A.L., Sakhabudinov R.V., Toritsyn I.V., Yakovlev A.A. Patent na izobretenie №2834247. Vysokovol'tnyy stend molnievogo razryada i sposob ispytaniy na vozdeystvie molniy [Patent for invention No. 2834247. High-voltage lightning discharge stand and method for testing for lightning impact]. Priority of invention July 10, 2024.

Яковлев Александр Анатольевич – АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79052500726; к.т.н.; начальник управления.

Сахабудинов Роман Владиславович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: sahabudinov@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79211852881; к.т.н.; доцент.

Голосий Александр Сергеевич – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79213025903; к.т.н.; доцент.

Yakovlev Aleksandr Anatolievich – ARSENAL DESIGN BUREAU JSK; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79052500726; cand. of eng. sc.; head of Department.

Sakhabudinov Roman Vladislavovich – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: stapler1@yandex.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79211852881; cand. of eng. sc.; associate professor.

Golosiy Aleksandr Sergeevich – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79213025903; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396.965.2

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-175-184

А.Н. Бакуменко, В.Т. Лобач

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАЛОВЫСОТНОГО МЕТОДА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Статья посвящена разработке и исследованию нового метода маловысотного профилирования отражающей поверхности с использованием радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), который позволяет получать радиолокационные изображения с высоким разрешением как по дальности, так и вдоль линии пути. В документе детально рассматриваются теоретические основы функционирования РСА систем, особенности формирования и обработки сигналов, а

также создание имитационной модели для проверки эффективности предложенного метода. В работе анализируются основные принципы работы РСА систем, включая использование зондирующих сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Эти сигналы играют критически важную роль в достижении высокой разрешающей способности, необходимой для качественного отображения мелких деталей на поверхности земли. В статье уделяется внимание учету особенностей движения носителя РСА, таких как его скорость и высота полета. Эти параметры оказывают существенное влияние на качество получаемых изображений, и их правильное управление позволяет значительно улучшить конечный результат. Авторы рассматривают влияние фазового фронта волны и эффекта Доплера на форму принимаемого траекторного сигнала. Понимание этих процессов необходимо для корректной интерпретации данных и повышения точности радиолокационных изображений. Представлена разработанная имитационная модель на языке программирования MATLAB, которая позволяет симулировать работу радиолокатора и оценивать качество получаемых изображений. Эта модель является важным инструментом для тестирования и оптимизации предложенного метода. В работе приводятся примеры результатов моделирования, которые подтверждают работоспособность и адекватность предложенной модели. Эти результаты показывают, что метод способен эффективно работать даже в сложных условиях и обеспечивать получение высококачественных радиолокационных изображений. Таким образом, статья представляет новый и перспективный метод маловысотного профилирования отражающей поверхности, который может быть использован в самых различных областях, включая научные исследования, мониторинг окружающей среды, сельское хозяйство, а также военные и гражданские приложения.

Радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА); маловысотное профилирование; зондирующий сигнал; линейная частотная модуляция (ЛЧМ); имитационная модель; MATLAB; разрешающая способность.

A.N. Bakumenko, V.T. Lobach

SIMULATION MODEL OF LOW-ALTITUDE METHOD OF PROFILING A REFLECTIVE SURFACE

The paper is devoted to the development and study of a new method for low-altitude surface profiling using a synthetic aperture radar (PCA), which allows obtaining high-resolution radar images both in range and along the track line. The paper examines in detail the theoretical foundations of PCA systems, the features of signal formation and processing, and the creation of a simulation model to test the effectiveness of the proposed method. The paper analyzes the basic principles of SAR systems, including the use of probing signals with linear frequency modulation (LFM). These signals play a critical role in achieving the high resolution required for high-quality display of small details on the earth's surface. The paper pays attention to taking into account the features of the SAR carrier's motion, such as its speed and flight altitude. These parameters have a significant impact on the quality of the obtained images, and their correct control can significantly improve the final result. The authors consider the influence of the wave phase front and the Doppler effect on the shape of the received trajectory signal. Understanding these processes is necessary for correct interpretation of data and improving the accuracy of radar images. The paper presents a developed simulation model in the MATLAB programming language, which allows simulating the operation of a radar and assessing the quality of the images obtained. This model is an important tool for testing and optimizing the proposed method. The paper provides examples of simulation results that confirm the performance and adequacy of the proposed model. These results show that the method is able to operate effectively even in difficult conditions and provide high-quality radar images. Thus, the article presents a new and promising method for low-altitude profiling of a reflective surface, which can be used in a variety of fields, including scientific research, environmental monitoring, agriculture, as well as military and civilian applications.

Synthetic aperture radar (SAR); low-altitude profiling; probing signal; linear frequency modulation (LFM); simulation model; MATLAB; resolution.

Введение. Последнее время наблюдается значительный прогресс в разработке технических принципов и аппаратуры для дистанционного исследования характеристик отражающей поверхности. Радиолокационные устройства для дистанционного зондирования земной поверхности или измерения параметров волнения морской поверхности с борта самолета имеют большие перспективы использования. Поскольку, их эффективность практически не зависит от метеорологических условий, они имеют несомненные

преимущества и позволяют проводить оперативные измерения на больших акваториях [1–5]. Аппаратура для измерения параметров морского волнения с летательных аппаратов имеет важное значение для решения ряда народнохозяйственных, научных и военных задач. Системы с радиолокационным синтезированием апертуры (РСА) позволяют получать высокую разрешающую способность при малых размерах реальной антенны, за счет сбора и совместной обработки сигналов, принятых в различных точках положения носителя. Для обеспечения высокой разрешающей способности по дальности в РСА системах используют сигналы с внутриимпульсной модуляцией. Наиболее широкое распространение получили зондирующие сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [6–13].

Постановка задачи. Решаемая задача заключается в разработке метода маловысотного профилирования отражающей поверхности с использованием радиолокатора с синтезированной апертурой, работающего в непрерывном режиме излучения простого гармонического сигнала с обеспечением высокой разрешающей способности по дальности и вдоль линии пути, а также имитационной модели для проверки предлагаемого маловысотного метода профилирования поверхности. Модель предполагает прямолинейное и равномерное движение носителя радиолокатора с синтезированной апертурой на неизменной высоте над поверхностью. Диаграмма направленности (ДНА) реальной антенной системы ориентирована строго в нади́р. Радар работает в режиме трассового синтезирования апертуры. Проекция траектории движения носителя на облучаемую поверхность называется линией пути (ЛП). Облучаемый участок поверхности, являющийся сечением ДНА, имеет узкую вытянутую вдоль ЛП форму. При трассовом синтезировании, вдоль ЛП располагается участок поверхности, называемый зоной радиолокационного обзора, границы зоны обзора располагаются параллельно ЛП, а сама ЛП представляется продольной осью симметрии зоны обзора [14–18]. Описанная сцена проиллюстрирована на рис. 1

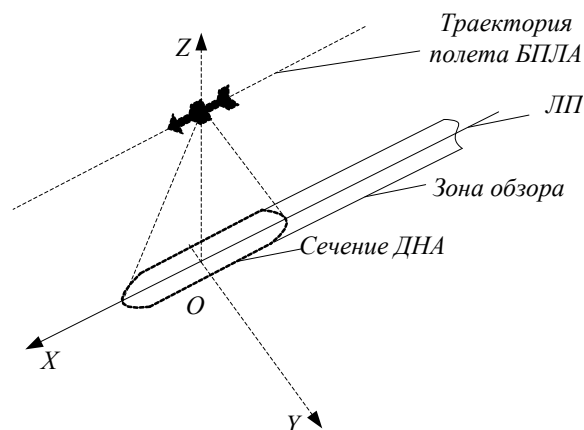


Рис. 1. Трассовое синтезирование апертуры

Максимальная длина участка пути БПЛА на котором принимается сигнал, отраженный одиночной целью L_m , ограничивается лишь шириной ДНА. Сигнал, принимаемый по мере движения носителя на вход радиоприемника без учета влияния диаграммы направленности, имеет вид

$$u_0(t) = U_i \cos[\omega_0(t - \tau_i) + \varphi_0 + \varphi_i],$$

где U_i – максимальное значение отраженного точечной целью сигнала; φ_i – изменение фазы сигнала при отражении; τ_i – задержка радиосигнала.

Задержка радиосигнала зависит от расстояния $r_i(t)$ между БПЛА и целью, которое изменяется в процессе движения носителя как показано на рис. 2.

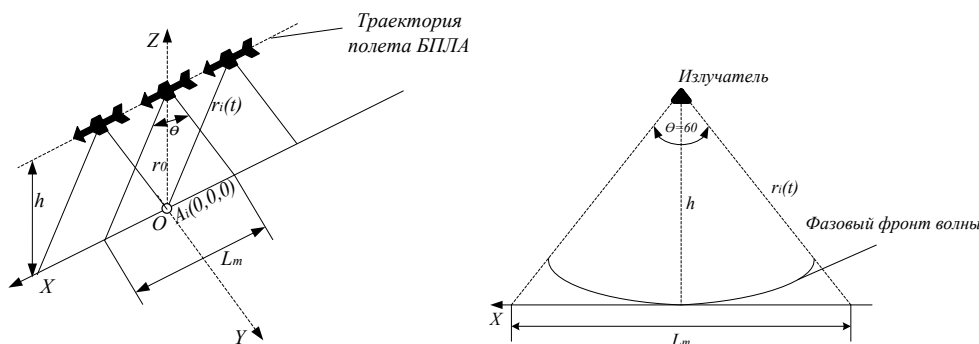


Рис. 2. Геометрия модели

Данное расстояние обуславливает закон изменения фазы отраженного точечной целью сигнала, с учетом которого, сигнал, отраженный точечной целью, имеет вид

$$u_0(t) = U_i \cos[\omega_0 t - \psi_r(t) + \varphi_0 + \varphi_i],$$

где $\psi_r(t)$ – закон изменения фазы отраженного точечной целью сигнала.

Применяя принцип суперпозиции и суммируя сигналы для всех значений $r_i(t)$, получаем суммарный отклик от одиночной цели [19–21]. Пользуясь тем, что высота полета БПЛА мала, и фазовый фронт падающей волны имеет сферическую форму, как показано на рис., обработка принятого сигнала производится путем применения набора согласованных фильтров, для каждого значения $r_i(t)$.

Имитационная модель маловысотного метода профилирования поверхности. Имитационная модель разработана на языке программирования MATLAB. Структура разработанной имитационной модели показана на рис. 3.



Рис. 3. Структура модели

В качестве установочных параметров можно задавать, высоту, скорость полета, и начальные координаты носителя, характер распределения точечных отражателей, их координаты и величину эффективной площади рассеивания (ЭПР). Ширину ДНА, частоту зондирующего сигнала, интервал измерения, шаг по пространству.

Исходя из заданных координат точечных отражателей, ширины ДНА, начальных координат носителя и высоты и скорости его полета, происходит расчет длинны освещаемого участка, длинны траектории полета носителя.

После чего происходит моделирование полученного траекторного сигнала по средствам вычисления текущих координат носителя, текущей дальности до отражающей точки и фазы принятого сигнала. В результате формируется отсчет принятого траекторного сигнала.

После получения траекторного сигнала начинается процесс обработки и формирования РЛИ. Обработка производится путем свертки полученного траекторного сигнала с набором опорных функций для каждой дальности. Результаты обработки представляются в графическом виде и сохраняются в численном формате для дальнейшего воспроизведения и исследования.

Условно имитационную модель можно разбить на пять блоков:

1. Блок задания координат целей и их ЭПР.
2. Блок задания и расчета параметров сигнала.
3. Блок задания и расчета параметров модели.
4. Блок моделирования траекторного сигнала.
5. Блок обработки сигнала.

Произведено моделирование траекторного сигнала для одиночной точечной цели. Моделировались отражённые сигналы для различных частот зондирующего сигнала, и параметров антенной системы. На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования для частоты зондирующего сигнала $f = 1.2 \cdot 10^9$ Гц, ширины ДНА $\theta = 120^\circ$, высоты полета $h = 2$ м и путевой скорости $W = 10$ М/с.

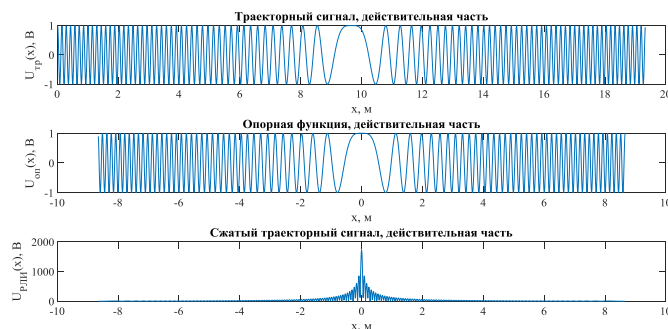


Рис. 4. Результаты моделирования сигнала, отраженного одиночной целью

Полученные графики траекторного сигнала, опорной функции и сжатого траекторного сигнала подтверждают работоспособность и адекватность разработанной модели. На рис. Рис. 6 показано РЛИ одиночной цели, расположенной на линии пути носителя на поверхности. Также было проведено моделирование со следующими параметрами модели частота зондирующего сигнала $f = 30 \cdot 10^9$ Гц, ширины ДНА $\theta = 60^\circ$, высоты полета $h = 2$ м и путевой скорости $W = 10$ М/с. РЛИ, полученное в результате моделирования представлено на рис. 6.

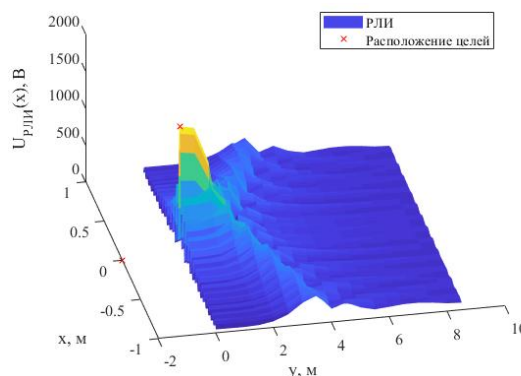


Рис. 5. РЛИ одиночной цели расположенной на ЛП на поверхности

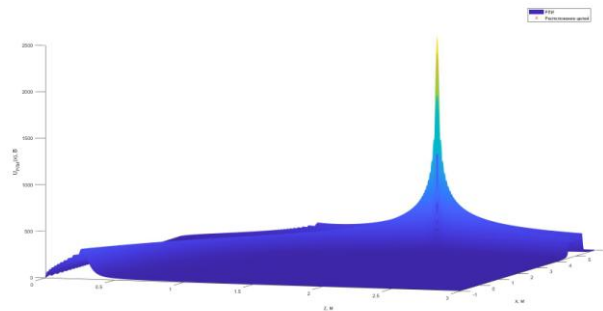


Рис. 6. РЛИ одиночной цели

При увеличении количества одиночных целей, расположенных на различных высотах, были получены радиолокационные изображения, представленные на рис. 7

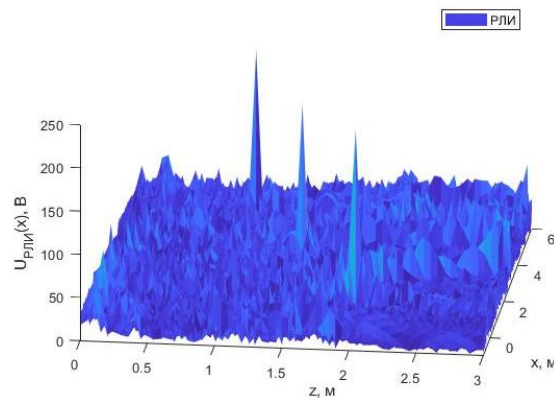
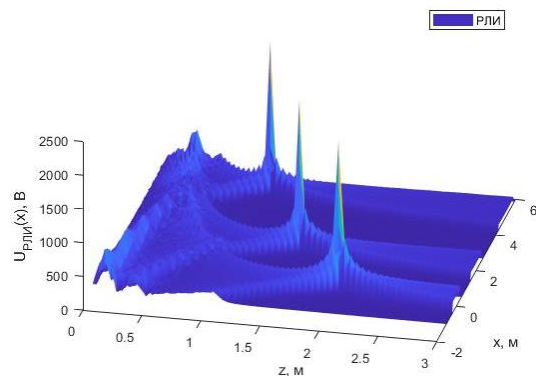


Рис. 7. РЛИ для трех одиночных целей на разных дальностях

Данное изображение получено при заданной скорости полета 10 м/с, и рабочей частоте 30 ГГц. Интервал измерения устанавливался равным 10^{-3} с.

При уменьшении интервала измерения происходит сглаживание полученного изображения, со значительным увеличением откликов целей и снижением уровня боковых составляющих. Что подтверждает адекватность модели. Результат представлен на рис. 8.

Рис. 8. РЛИ для трех целей интервал измерения 10^{-4} с.

При определении разрешающей способности по линии пути и по дальности было получено РЛИ для одиночной цели, представленное на рис. 9.

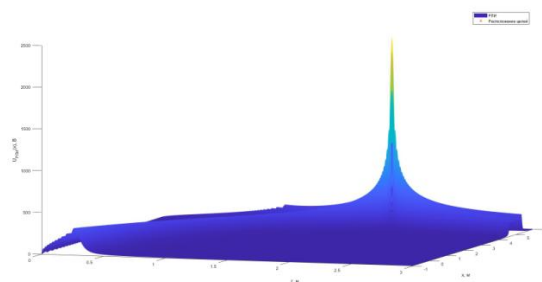


Рис. 9. РЛИ одиночной цели с шагом моделирования по дальности и линии пути 1мм

Цель была расположена на 2 метрах по дальности и на 5 метрах по линии пути, соответствующие сечения РЛИ представлены на рис. 10 и 11. Из анализа полученных графиков видно, что уровень главного максимума превышает уровни боковых максимумов минимум в 3 раза, что соответствует 9.5 дБ.

$$\text{дБ} = 20 \log \left(\frac{V_1}{V_2} \right) = 20 \log(3) = 9,54$$

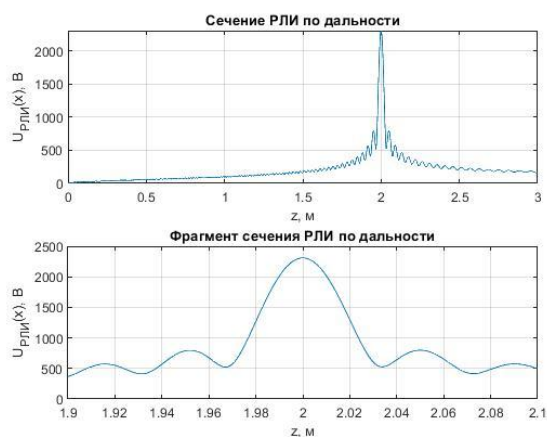


Рис. 10. Сечение РЛИ одиночной цели по дальности

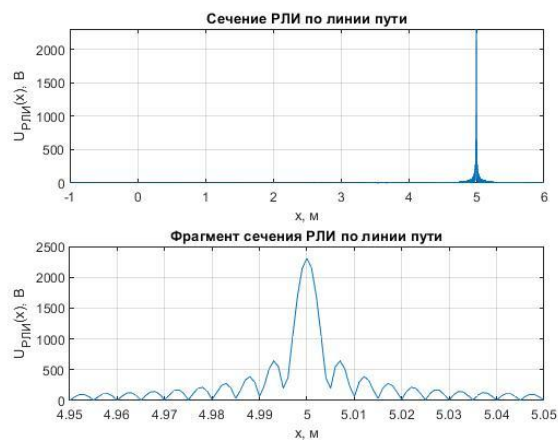


Рис. 11. Сечение РЛИ одиночной цели по линии пути

Исходя из ширины главного максимума по уровню 0.5, разрешение по дальности составляет

$$\delta_z = 0.04 \text{ м},$$

а разрешение по линии пути составляет

$$\delta_x \approx 0.006 \text{ м}.$$

Заключение. Предлагаемый метод маловысотного профилирования отражающей поверхности позволяет получать радиолокационное изображение отражающей поверхности с высоким разрешением по дальности и по линии пути при использовании зондирующего сигнала в виде простого гармонического колебания. Полученные результаты обеспечиваются при работе радиолокатора на малой высоте, в результате чего фазовый фронт волны имеет сферическую форму, а вследствие движения носителя и возникающего эффекта Доплера принимаемый траекторный сигнал имеет форму ЛЧМ сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антипов В.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. – Радио и связь, 1988.
2. Лобач В.Т. Статистические характеристики радиолокационных сигналов, отраженных от морской поверхности. – М.: Радио и связь, 2006. – 250 с.
3. Лобач В.Т. Влияние изменчивости локального коэффициента отражения на статистические характеристики отраженного электромагнитного поля в условиях ограниченного пространственного разнесения точек излучения и приема // Антенны. – 2003. – № 6.
4. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 675 с.
5. Коберниченко В.Г. Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие. – 2016.
6. Gorham L.R.A., Moore L.J. SAR image formation toolbox for MATLAB // Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVII. – SPIE, 2010. – Vol. 7699. – P. 46-58.
7. Bakumenko A. et al. Connected component labeling algorithm in streaming image processing with FPGAs // SPIE Future Sensing Technologies 2021. – SPIE, 2021. – Vol. 11914. – P. 328-340.
8. Bakumenko A. et al. Crop seed classification based on a real-time convolutional neural network // SPIE Future Sensing Technologies. – SPIE, 2020. – Vol. 11525. – P. 654-667.
9. Ковалев А.В., Бакуменко А.Н. Алгоритм маркировки связанных областей при потоковой обработке изображения // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 4 (88). – С. 191-201.
10. Бахчевников В.В., Деркачев В.А., Бакуменко А.Н. Способ использования средств быстрого прототипирования для реализации сверточной нейронной сети на ПЛИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 3 (213). – С. 146-156.
11. Деркачев В.А., Бахчевников В.В., Бакуменко А.Н. Классификатор изображений семян сельскохозяйственных культур с использованием сверточной нейронной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4 (214). – С. 32-39.
12. Бахчевников В.В., Деркачев В.А., Бакуменко А.Н. Метод разработки искусственных нейронных сетей для прототипирования на ПЛИС с помощью средств Xilinx System Generator и Matlab // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении" КомТех-2020". – 2020. – С. 462-468.
13. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // Josa. – 1954. – Vol. 44, No. 11. – P. 838-850.
14. Hughes B.A., Grant H.L., Chappell R.W. A fast response surface-wave slope meter and measured wind-wave moments // Deep Sea Research. – 1977. – Vol. 24, No. 12. – P. 1211-1223.
15. Haimbach S., Wu J. Field trials of an optical scanner for studying sea-surface fine structures // IEEE journal of oceanic engineering. – 1985. – Vol. 10, No. 4. – P. 451-453.
16. Hwang P.A., Shemdin O.H. The dependence of sea surface slope on atmospheric stability and swell conditions // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1988. – Vol. 93, No. C11. – P. 13903-13912.
17. Христофоров Г.Н. и др. Лазерная локация топографических неоднородностей на шероховатой морской поверхности // Морской гидрофизический журнал. – 1993. – № 6. – С. 64-73.
18. Gatebe C.K. et al. Airborne spectral measurements of ocean directional reflectance // Journal of the atmospheric sciences. – 2005. – Vol. 62, No. 4. – P. 1072-1092.
19. Bréon F.M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2006. – Vol. 111. – No. C6.

20. Мысленков С.А., Михайлов В.А. Измерение параметров волн в голубой бухте (Геленджик) при помощи видеокамеры и рейки // Комплексные исследования Мирового океана. – 2019. – С. 372-373.
21. Prager S., Moghaddam M. Application of ultra-wideband synthesis in software defined radar for UAV-based landmine detection // IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2019. – P. 10115-10118.

REFERENCES

1. Antipov V.N. i dr. Radiolokatsionnye stantsii s tsifrovym sintezirovaniem apertury anteny [Radar stations with digital synthesis of antenna aperture]. Radio i svyaz', 1988.
2. Lobach V.T. Statisticheskie kharakteristiki radiolokatsionnykh signalov, otrazhennykh ot morskoy poverkhnosti [Statistical characteristics of radar signals reflected from the sea surface]. Moscow: Radio i svyaz', 2006, 250 p.
3. Lobach V.T. Vliyanie izmenchivosti lokal'nogo koeffitsienta otrazheniya na statisticheskie kharakteristiki otrazhennogo elektromagnitnogo polya v usloviyakh ogranichenogo prostranstvennogo razneseniya tochek izlucheniya i priema [Influence of variability of local reflection coefficient on statistical characteristics of reflected electromagnetic field under conditions of limited spatial separation of emission and reception points], *Antenny* [Antennas], 2003, No. 6.
4. Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Space-based radar systems for land survey]. Moscow: Radiotekhnika. 2010, 675 p.
5. Kobernichenko V.G. Radioelektronnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: ucheb. posobie [Radioelectronic systems of remote sensing of the Earth: a tutorial], 2016.
6. Gorham L.R.A., Moore L.J. SAR image formation toolbox for MATLAB, *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVII*. SPIE, 2010, Vol. 7699, pp. 46-58.
7. Bakumenko A. et al. Connected component labeling algorithm in streaming image processing with FPGAs, *SPIE Future Sensing Technologies 2021*. SPIE, 2021, Vol. 11914, pp. 328-340.
8. Bakumenko A. et al. Crop seed classification based on a real-time convolutional neural network, *SPIE Future Sensing Technologies*. SPIE, 2020, Vol. 11525, pp. 654-667.
9. Kovalev A.V., Bakumenko A.N. Algoritim markirovki svyazannykh oblastey pri potokovoy obrabotke izobrazheniya [Algorithm for marking connected areas in streaming image processing], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2022, No. 4 (88), pp. 191-201.
10. Bakhchevnikov V.V., Derkachev V.A., Bakumenko A.N. Sposob ispol'zovaniya sredstv bystrogo prototipirovaniya dlya realizatsii svertochnoy neyronnoy seti na PLIS [Method of using rapid prototyping tools for implementing a convolutional neural network on FPGA], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 3 (213), pp. 146-156.
11. Derkachev V.A., Bakhchevnikov V.V., Bakumenko A.N. Klassifikator izobrazheniy semyan sel'skokhozyaystvennykh kul'tur s ispol'zovaniem svertochnoy neyronnoy seti [Classifier of images of agricultural seeds using a convolutional neural network], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (214), pp. 32-39.
12. Bakhchevnikov V.V., Derkachev V.A., Bakumenko A.N. Metod razrabotki iskusstvennykh neyronnykh setey dlya prototipirovaniya na PLIS s pomoshch'yu sredstv Xilinx System Generator i Matlab [Method for developing artificial neural networks for prototyping on FPGA using Xilinx System Generator and Matlab], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii* "KomTekh-2020" [Computer and information technologies in science, engineering and management "KomTech-2020"], 2020, pp. 462-468.
13. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter, *Josa*, 1954, Vol. 44, No. 11, pp. 838-850.
14. Hughes B.A., Grant H.L., Chappell R.W. A fast response surface-wave slope meter and measured wind-wave moments, *Deep Sea Research*, 1977, Vol. 24, No. 12, pp. 1211-1223.
15. Haimbach S., Wu J. Field trials of an optical scanner for studying sea-surface fine structures, *IEEE journal of oceanic engineering*, 1985, Vol. 10, No. 4, pp. 451-453.
16. Hwang P.A., Shemdin O.H. The dependence of sea surface slope on atmospheric stability and swell conditions, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1988. – Vol. 93, No. C11, pp. 13903-13912.
17. Khristoforov G.N. i dr. Lazernaya lokatsiya topograficheskikh neodnorodnostey na sherokhovatoy morskoy poverkhnosti [Laser location of topographic inhomogeneities on a rough sea surface], *Morskoy gidrofizicheskii zhurnal* [Marine Hydrophysical Journal], 1993, No. 6, pp. 64-73.
18. Gatebe C.K. et al. Airborne spectral measurements of ocean directional reflectance, *Journal of the atmospheric sciences*, 2005, Vol. 62, No. 4, pp. 1072-1092.

19. Bréon FM., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, Vol. 111, No. C6.
20. Myslenkov S.A., Mikhaylov V.A. Izmerenie parametrov voln v goluboy bukhte (Gelendzhik) pri pomoshchi videokamery i reyki [Measurement of wave parameters in blue bay (Gelendzhik) USING a video camera and a staff], *Kompleksnye issledovaniya Mirovogo okeana* [Integrated studies of the World Ocean], 2019, pp. 372-373.
21. Prager S., Moghaddam M. Application of ultra-wideband synthesis in software defined radar for UAV-based landmine detection, *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2019, pp. 10115-10118.

Бакуменко Алексей Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: baku@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79886031853; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем.

Лобач Владимир Тихонович – Южный федеральный университет; e-mail: vtlobach@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185233270; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

Bakumenko Alexey Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: baku@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79886031853; the Department of Radio Engineering & Telecommunication Systems; assistant professor.

Lobach Vladimir Tikhonovich – Southern Federal University; e-mail: vtlobach@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185233270; the Department of Radio Engineering & Telecommunication Systems; associate professor.

Раздел III. Вычислительные и информационно-управляющие системы

УДК 621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-185-203

Д.А. Гриценко, И.Б. Аббасов

ОБЗОР ТЕНДЕНЦИЙ В РАЗРАБОТКЕ БИОМИМЕТИЧЕСКИХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Представлен обзор некоторых современных тенденций в разработке и создании биомиметических подводных аппаратов. Биомиметика как междисциплинарная область науки черпает вдохновение из природных форм, что позволяет разработчикам создать оригинальные решения для задач подводных исследований. Во введении отмечена актуальность задачи и преимущества биомиметических конструкций, приведены некоторые успешные примеры использования данных подводных объектов. Указана цель, задачи обзора, описаны методы сбора, анализа информации. Отмечены особенности данной междисциплинарной области разработок подводных аппаратов, которые конструируются с учётом не только технологичности, также используются знания из области биологии. Представлены конструкции биомиметических роботов рыб, материалы для этих подводных аппаратов с учётом обтекаемости. Описаны разновидности технологий создания автономных подводных аппаратов, их особенности движения и управления в водной среде: рыбоподобные движения, реактивная тяга. Подчеркнуты методы управления биороботами, указаны разработки на основе движения плавниками ската манти. Отмечена важность применение глубокого обучения с подкреплением при моделировании управления подводного аппарата. Подробно представлены примеры разработки биомиметических подводных аппаратов на основе вычислительного анализа динамики жидкости, возникновение турбулентности при различных типах движения. Некоторые разработчики создали бионические дельфиноподобные роботы, объединив механические свойства и подводное планирование, что позволило значительно улучшить маневренность и скорость этих аппаратов. Рассмотрены некоторые примеры реализации метода бионического дизайна в области судостроения, авиации. Отмечены проблемы и перспективы развития биомиметических технологий применительно к разработкам подводных автономных биомиметических аппаратов. В заключение указаны основные результаты исследования и перспективы развития биомиметических технологий в морской инженерии.

Автономные беспилотные подводные аппараты; биомиметика; искусственные модели подводной фауны; беспилотные биомиметические подводные аппараты; рыбоподобные роботы; конструкция подводных биомиметических аппаратов; управление подводными аппаратами.

D.A. Gritsenko, I.B. Abbasov

A REVIEW OF TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF BIOMIMETIC UNDERWATER VEHICLES

This paper presents an overview of some modern trends in the development and creation of biomimetic underwater vehicles. Biomimetics as an interdisciplinary field of science draws inspiration from natural forms, which allows developers to create original solutions for underwater research problems. The introduction notes the relevance of the problem and the advantages of biomimetic designs, and provides some successful examples of using these underwater objects. The purpose and objectives of the review are indicated, and the methods for collecting and analyzing information are described. The features of this interdisciplinary field of underwater vehicle development are noted, which are designed taking into account not only technology, but also using knowledge from the field of biology. The designs of biomimetic fish robots, materials for these underwater vehicles are presented, taking into account streamlining. The varieties of technologies for creating autonomous underwater vehicles, their features of movement and

control in the aquatic environment are described: fish-like movements, jet thrust. The methods of controlling biorobots are emphasized, developments based on the movement of the fins of the manta ray are indicated. The importance of using deep reinforcement learning in modeling the control of an underwater vehicle is noted. Examples of the development of biomimetic underwater vehicles based on computational analysis of fluid dynamics, the occurrence of turbulence in various types of motion are presented in detail. Some developers have created bionic dolphin-like robots by combining mechanical properties and underwater planning, which has significantly improved the maneuverability and speed of these devices. Some examples of the implementation of the bionic design method in the field of shipbuilding and aviation are considered. The problems and prospects for the development of biomimetic technologies in relation to the development of underwater autonomous biomimetic vehicles are noted. In conclusion, the main results of the study and the prospects for the development of biomimetic technologies in marine engineering are indicated.

Autonomous unmanned underwater vehicles; biomimetics; artificial models of underwater fauna; unmanned biomimetic underwater vehicles; fish-like robots; design of underwater biomimetic vehicles; control of underwater vehicles.

Введение. Для современных подводных исследований всё чаще разрабатываются роботы, которые подражают живым организмам в их внешнем виде, способах передвижения и принципах функционирования. Эти организмы, такие как насекомые, рептилии, рыбы и млекопитающие, в подавляющем своем большинстве являются результатом длительного процесса эволюции. В последнее десятилетие было создано множество интересных подводных беспилотных аппаратов, которые копируют внешний вид и методы передвижения морских существ.

В настоящее время существует пример биомиметического подводного аппарата, который используется в Военно-морских силах США. Этот аппарат называется Ghost Swimmer [1] (рис. 1, слева). Его название связано с важными с военной точки зрения характеристиками: он обладает более энергоэффективным и бесшумным движением по сравнению с традиционными винтовыми гребными системами. Кроме того, этот аппарат трудно отличить от настоящих обитателей подводной среды (от акулы), что обеспечивает ему большую скрытность и потенциальный радиус действия, зависящий от степени схожести с живым аналогом BUV (biomimetic underwater vehicle).

Следует подчеркнуть, что в этом обзоре представлены некоторые зарубежные и отечественные биомиметические автономные подводные аппараты. К сожалению, отечественные разработки в этой области значительно отстают от мировых тенденций, поэтому данный обзор может содействовать пониманию и оценке современных достижений. Обзор не претендует на всеохватывающий и включает лишь некоторые примеры перспективных направлений применения этих подводных аппаратов. При составлении данного обзора использовался метод обработки исходной информации, который включает в себя сбор, анализ, сравнение и синтез. В качестве исходных данных были взяты современные научные публикации, также электронные ресурсы, посвященные разработке морских биомиметических систем.

Биомиметические подводные аппараты. Можно отметить работу [2], в которой автор исследует новые конструкции BUV (biomimetic underwater vehicle), разработанные в рамках специальных проектов, основанные на опыте строительства пяти версий польских BUV, называемых CyberFish. Все версии CyberFish были построены в Краковском политехническом университете. 3-я и 5-я версии, наглядно проиллюстрированные (рис. 1, справа и рис. 2), были построены в сотрудничестве с Польской военно-морской академией.

В целом CyberFish состоит из четырех жестких сегментов, соединенных вращательными кинематическими парами. Первый самый большой сегмент представляет собой искусственную голову с боковыми плавниками, а следующие три сегмента создают подвижный искусственный хвост рыбы.

На рис. 2 показано силиконовое покрытие CyberFish, подводный аппарат был разработан для максимально близкой имитации пресноводной карповой рыбы. Более подробная информация о конструкции и принципах работы CyberFish приведена в работе [3]. Искусственное покрытие имитирует рыбью чешую и позволяет CyberFish увеличить сходство с рыбой карп, обитающей во внутренних водах. Транспортное средство, «носящее» такое покрытие и движущееся волнообразно, едва заметно для реальных обитателей подводной среды [4].



Рис. 1. Роботы GhostSwimmer [1] и CyberFish ver. 3 в бассейне [2]

CyberFish является хорошим демонстратором биомиметической технологии, показывающим возможные преимущества BUV в области подводной разведки, особенно в области секретных операций. Но недостатком такой презентации технологий является отсутствие возможности тестирования и полноценной работы большинства подводных датчиков, например, сонара, гидрофона и т.д. Этот недостаток в основном обусловлен малыми размерами CyberFish. Кроме того, бортовая система управления имеет недостаточную вычислительную мощность для высокоуровневых алгоритмов управления, реализующих автономное поведение.



Рис. 2. Силиконовое покрытие CyberFish ver. 5 [4]

Положительный опыт и результаты, достигнутые в процессе проектирования, создания и, наконец, тестирования CyberFish были одной из главных причин запуска польского проекта, а затем и международного проекта.

Далее отметим некоторые отечественные разработки в данной области. В обзорной статье [5] отмечается, что биомиметика, как междисциплинарное направление разработок формируется на базе системного обобщения достижений из областей: биологии, математики, информатики, электроники, механики, материаловедения, робототехники с применением принципов биологической имитации.

В статье [6] описана конструкция опытного образца робота-рыбы, состоящего из корпуса, хвостовой части и боковых плавников. При этом робот плавает на заданной глубине, может поворачиваться, осуществлять динамическое погружение и всплытие.

Разработки по созданию образцов малых автономных подводных аппаратов, основанных на бионических принципах движения, описываются в обзорной работе [7]. Они могут быть использованы для мониторинга, разведки, боевого охранения надводных и подводных сооружений, также описываются их конструкции, методы движения и критерии экономичного энергопотребления.

Статья [8] посвящена результатам экспериментального и численного моделирования движения рыбоподобного подводного робота. Данная модель позволяет исследовать биоморфное плавание робота с различными параметрами движения, и расчетная схема позволяет получать данные, подтвержденные проведенными экспериментами.

В работе [9], посвященной обзору и определению проблемных вопросов, связанных с конструированием подводных аппаратов, авторы рассматривают основные принципы биомиметической конструкции, такие как: адаптация формы, структуры и поверхности тела подводных существ для создания корпусов технических объектов с оптимальной гидродинамикой, а также имитацию и механизмы передвижения биологических организмов, взмах плавников, движения хвоста, для разработки эффективных систем привода и маневренности морских автономных аппаратов. Отдельно отмечены скаты, которые «обладают уникальной техникой плавания, используя взмахи грудными плавниками, что обеспечивает им эффективность, сравнимую с другими рыбами. Их обтекаемые формы и кожное покрытие с низким сопротивлением к скольжению способствуют этим преимуществам. Уникальное движение плавников позволяет им перемещаться с меньшими затратами энергии». Далее в работе обсуждаются зарядные устройства для подводных аппаратов и различные методы подводной зарядки. Также обсуждаются ключевые аспекты управления подводными биомиметическими аппаратами: контроль глубины, гидролокаторы, GPS и инерциальные навигационные системы. Приводятся примеры различных моделей биомиметических аппаратов, похожих на рыб, скатов, медуз, черепах, осьминогов и ракообразных [10, 11].

Обзор типов движения автономных биомиметических подводных аппаратов. В работе Hasan K. et al [12] автономные подводные аппараты (autonomous underwater vehicle – AUV) олицетворяют революционный шаг в подводных исследованиях, легко принимая на себя задачи, которые когда-то были исключительно для пилотируемых аппаратов. Их работа в рамках совместных миссий открыла новую эпоху сложных приложений в подводных областях. Основная цель работы [12] – изучить последние технологические достижения в области AUV и их роль в навигации в сложных подводных средах. Этот обзор синтезирует технологические достижения, освещая последние разработки в моделях биомиметики, в передовых системах управления, адаптивных навигационных алгоритмах и основных массивах датчиков, имеющих решающее значение для картирования дна океана. Эта работа предоставляет действенные идеи и направления для продвижения области подводной робототехники.

Для прогнозирования динамических характеристик рыбоподобного AUV, который разрабатывается в Национальном университете Тайваня, был реализован практический метод моделирования волнообразной локомоции гибкого тонкого тела [13]. Когда гибкое тонкое тело, разделенное на множество сегментов, совершает колебания, волна проходит от носа к хвосту. Учитываются силы реакции, обусловленные изменением импульса, трением, а также сопротивление поперечного потока, действующие на каждый сегмент. Уравнения движения, описываемые координатами тела, получаются суммированием продольной силы, поперечной силы и момента рысканья, действующих на все сегменты. При численном моделировании применяется метод цифровой фильтрации, чтобы избежать дрейфа в движениях раскачивания, рыскания, и получить устойчивые решения. На основе результатов серии имитационных расчетов в работе [14] показаны и обсуждены динамические характеристики испытательного стенда BAUV.

По мнению авторов статьи [15] биомиметические подводные роботы привлекают значительное внимание исследователей во всем мире благодаря их более тихой работе, более высокой эффективности движителей и большей маневренности по сравнению с обычными подводными аппаратами, оснащенными осевыми движителями. В этой научной работе представляется обзор текущих исследований в данной области. Сначала рассматривается состояние разработки биомиметических подводных роботов с корпусом и хвостовым плавником, средним и парным плавником, а также их гибридных движителей. Затем описываются методы управления движением, используемые в биомиметических подводных роботах, включая управление плаванием с открытым контуром и типичные стратегии управления с закрытым контуром. В частности, подробно описаны последние исследования подводных роботов серии RobCutt, которые отображены на рис. 3. На этой основе обобщаются некоторые критические вопросы и направления дальнейшей работы. Высказывается предположение, что биомиметические подводные роботы будут иметь отличные перспективы в исследовании подводной среды и использовании ресурсов.

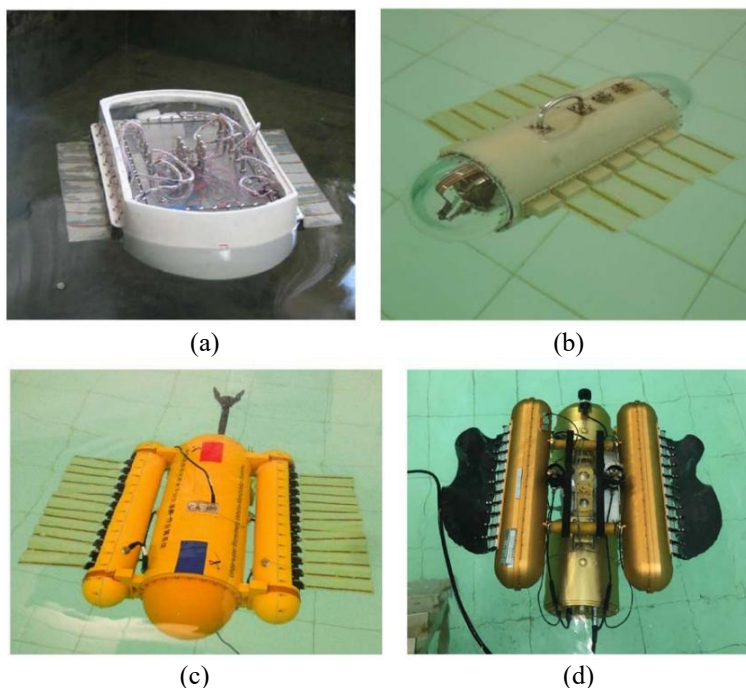


Рис. 3. Подводные роботы: (a) RobCutt-I; (b) RobCutt-II; (c) RobCutt-III; (d) RobCutt-IV [15]

В обзорной статье [16, 17] анализируется текущее состояние исследований по устойчивости подводных аппаратов на основе различных критериев. Соответствующая литература в базах данных China National Knowledge Infrastructure (CNKI) и Web of Science (WoS) была изучена с помощью CiteSpace и VOSviewer. Создан визуальный атлас исследователей, учреждений и ключевых слов. Кроме того, подробно представлены китайские и международные исследования в трех областях, в том числе стилистика и структурный дизайн, управление движением и оптимизация систем, а также обсуждаются основные методы исследования. Также в работе описаны новые тенденции и выделены существующие проблемы в данной области.

В работе [18] представлен мягкий робот, воспроизводящий способность головоногих моллюсков передвигаться в водной среде с помощью импульсной реактивной тяги. В этом режиме движения, прерывистая струя жидкости выбрасывается через сопло и сворачивается в вихревое кольцо. Было доказано, что возникновение вихревого кольца в плоскости выхода из сопла обеспечивает дополнительную тягу по сравнению с тягой, создаваемой непрерывной струей. Ряд авторов проводили эксперименты с устройствами для создания вихревой тяги в виде поршнево-цилиндрических камер и колеблющихся диафрагм. В данном случае основное внимание уделяется созданию точной биомиметики структурных и функциональных характеристик осьминога *Octopus vulgaris*. Схематическое изображение последовательности пульсаций с внешней стороны мантии осьминога отображено на рисунке 4. Мантия расширяется, и вода всасывается через клапаны и, в незначительной степени, через сифон; мантия сжимается, и вода изгоняется через сифон, образуя структурированное вихревое кольцо [18].

Для этого общая форма робота-плавунца достигается путем отливки силиконового слепка настоящего осьминога, что позволяет получить достоверную копию как внешней, так и внутренней камеры мантии осьминога. Цикл активации основан на сжатии/расслаблении эластичной камеры с помощью троса, который прогоняет жидкость через сифонообразную насадку и в конечном итоге обеспечивает необходимую тягу для

приведения робота в движение. Представленный здесь прототип демонстрирует пригодность вихревых движителей для создания мягких беспилотных подводных аппаратов.

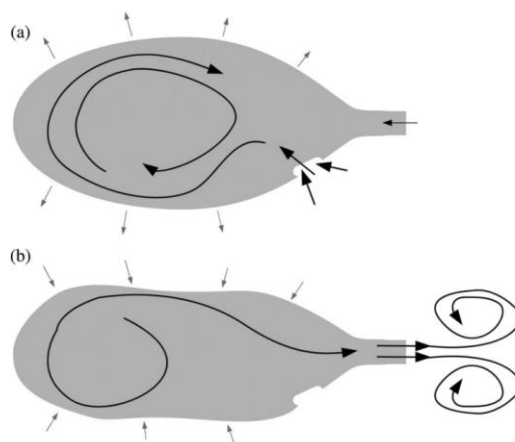


Рис. 4. Схематическое изображение последовательности пульсаций с внешней стороны мантии осьминога [18]

Проектирование рыбоподобного биоморфного движителя. Из отечественных исследований можно отметить также работу [19]. В ней одним из ключевых направлений в области робототехники обозначен поиск новаторских решений для создания биоморфных роботов. В статье рассматривается проектирование приводного механизма для подводного робота, выполненного в форме рыбы, основанного на принципах мягкой робототехники. Биомиметический робот сконструирован с использованием гибкого корпуса и движущегося хвоста, управление которым осуществляется с помощью оптимизированного по скорости двигателя постоянного тока, а также сервомотора для задания направления движения. Использование двигателя постоянного тока для приведения робота в движение уменьшает потери энергии по сравнению с другими колебательными устройствами, которые обычно управляются одним или несколькими серводвигателями.

На рис. 5–7 представлена компоновка роботизированной рыбы. Большинство частей корпуса при прототипировании выполнены из пластика полиэтилентерефталатгликоль (ПЭТГ) с применением аддитивных технологий. В ходе проектирования системы были разработаны два различных прототипа хвостов [19].

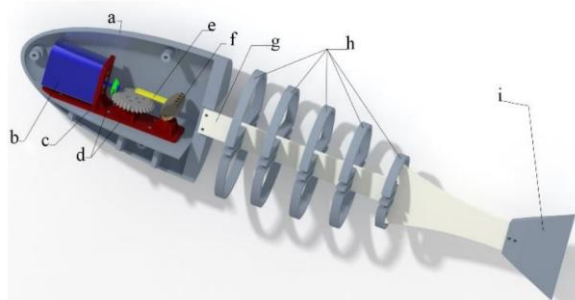


Рис. 5. Прототип с применением несущей конструкции для хвоста [19]

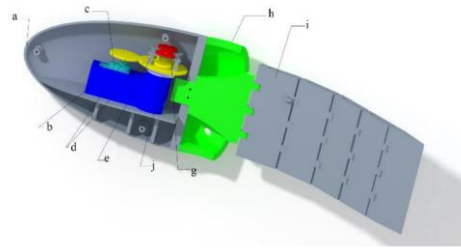


Рис. 6. Прототип с применением многосегментного хвоста [19]



Рис. 7. Собранные прототипы [19]

Маневрирование и управление биомиметическим автономным подводным аппаратом. В работе [20] в качестве нового биологического подводного транспортного средства был разработан роботизированный скат манта (RoMan-II, характеристики отображены ниже на рис. 8 и в табл. 1) для потенциального морского применения. Скат манта может выполнять разнообразные движения в воде, манипулируя двумя широкими плавниками. Эти движения были реализованы в разработанном роботе-рыбе, включая плавание с помощью хлопающих плавников, поворот с помощью модуляции фазовых соотношений плавников и онлайн-переход между различными моделями движения. Движения осуществляются с помощью модели искусственных центральных генераторов паттернов, построенных на основе связанных нелинейных осцилляторов. Предполагается, что метод управления, продемонстрированный на роботе-манта, может стать основой для решения проблем управления локомоцией в других типах многофункциональных роботов-рыб или более общих роботов с ритмичной моделью движения.

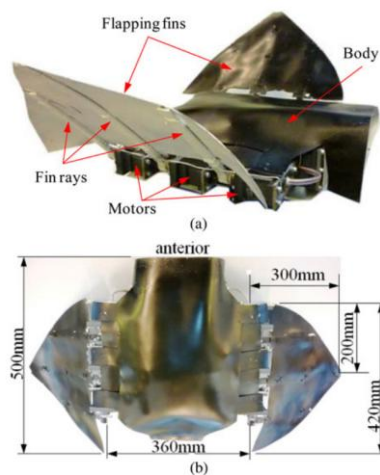


Рис. 8. Роботизированный скат манта RoMan-II: (а) внешний вид и (б) основные размеры (вид сверху) [20]

Таблица 1

Характеристики RoMan-II [Chunlin, 2012]

Масса	Приблизительно 7,3 кг
Размеры движителя	500 мм (Д) x 105 мм (В) x 960 мм (Ш)
Привод	Шесть бесщеточных серводвигателей постоянного тока
Контроллер	PIC18F2431 и PIC18F4520
Источник питания	7,2 В постоянного тока, два комплекта Ni-MH аккумуляторов емкостью 4500 мАч
Скорость плавания	0,4 м/с, 0,8 об/с (макс.)
Время работы	Примерно 6 часов для плавания, примерно 9 часов для планирования

В работе [21] представлен подход к маневрированию и управлению биомиметическим автономным подводным аппаратом BAUV (biomimetic autonomous underwater vehicle). Аппарат плывет вперед, колеблясь корпусом и хвостовым плавником. Он поворачивает, изгибая свое тело и хвостовой плавник в направлении предполагаемого движения. Функция body-spline задается набором параметров. Генетические алгоритмы используются для поиска значений параметров путем оценки функции приспособленности в течение нескольких пробных плаваний в аквариуме. Подходящая функция определяется как отношение кинетической энергии движения вперед к требуемой мощности двигателей суставов.

Предложен закон управления, который использует частоту колебаний для управления скоростью движения вперед и применяет параметр смещения тела-сплайна для управления скоростью рысканья. Скользящие средние скорости плавания и углы поворота используются в качестве сигналов обратной связи для управления скоростью движения и углом поворота BAUV. Эффективность алгоритма управления подтверждена экспериментально.

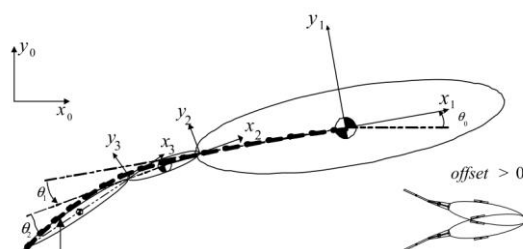


Рис. 9. Определение координат BUUV и body-spline [21]

Так как упомянутые ранее автономные подводные аппараты AUV – это подводные роботы, способные выполнять определенные задачи без помощи человека-оператора, то одним из ключевых навыков каждого AUV является способность избегать столкновений. Для этого необходимы соответствующие устройства и программное обеспечение, способные обнаруживать препятствия и принимать правильные решения с точки зрения как задачи, так и безопасности аппарата. В статье [22] представлена нейронная система предотвращения столкновений, разработанная для биомиметического автономного подводного аппарата BAUV. Задача нейронной сети – принимать решения о маневрах транспортного средства в горизонтальной плоскости, но только в непосредственной близости от препятствий. Она реализована в виде эволюционной искусственной нейронной сети, разработанной с помощью нейроэволюционного метода. В статье описывается работа и конструкция BUUV, а также роль нейронной системы в управлении всей системой.

Управление биомиметическим подводным аппаратом с помощью глубокого обучения с подкреплением. В статье [23] рассматривается проблема управления подводным слежением за целью для биомиметического подводного аппарата BAUV. Поскольку построить эффективную математическую модель BAUV сложно из-за неопределенности гидродинамики, управление сопровождением цели достигается с помощью глубокого обучения с подкреплением. Описаны состояния системы и функция

вознаграждения для управления сопровождением подводной цели. В рамках концепции обучения с подкреплением, основанной на акторной критике, предложен глубокий детерминированный градиентный алгоритм с контроллером наблюдения.

Представлены приемы обучения, включая приоритетное повторение опыта, обучение сети акторов с косвенным наблюдением, обновление сети целей с различными периодами и расширение пространства исследования за счет применения случайного шума. Проведено сравнительное моделирование, демонстрирующее эффективность приемов обучения. Наконец, предложенный алгоритм подкрепляющего обучения с критической оценкой действий и контроллером наблюдения применяется на физическом BAUV. Для проверки эффективности и надежности предложенного метода проводятся эксперименты в бассейне по отслеживанию подводных объектов на BAUV в различных сценариях.

В обзорной работе [24] рассматриваются биомиметические подводные роботы, созданные с использованием интеллектуальных приводов, например, сплава с памятью формы (shape-memory alloy – SMA), ионного полимерного металлокомпозиата (ionic polymer-metal composite or compound – IPMC), цирконата-титаната свинца (PZT, где P – аббревиатура элемента свинца Pb, Z – аббревиатура элемента циркония Zr, T – аббревиатура элемента титана Ti) или гибридного привода SMA и IPMC. Также рассмотрено влияние подводной среды, поскольку интеллектуальные приводы часто подвержены влиянию внешней среды. Характеристики интеллектуальных приводов описываются в зависимости от условий их работы и типов движения.

Подводные роботы классифицируются на основе различных режимов плавания. Классификация была расширена до нерыбных существ, основываясь на их режимах плавания. Тенденции развития биомиметических подводных роботов были проанализированы на основе скорости робота. По скорости на длину тела, роботы, использующие SMA в качестве привода, быстрее роботов, использующих IPMC, при одинаковой длине и весе. Наконец, роботы (с интеллектуальными приводами или двигателем) сравнивались с подводными животными по скорости и различным режимам плавания. Этот обзор может помочь обозначить ориентиры для разработки будущих биомиметических подводных роботов.

Обзор вычислительного анализа динамики жидкости биомиметических подводных аппаратов. В статье [25] биомиметика, черпающая вдохновение из природы, стала ключевым подходом в разработке подводных транспортных средств. Интеграция этого подхода с вычислительной гидродинамикой (computational fluid dynamics – CFD) еще больше продвинула исследования в этой области. Вычислительная гидродинамика способствует глубокому пониманию и решению сложных гидродинамических задач, что улучшает скорость, надежность и маневренность подводных объектов и способствует снижению их сопротивления и шума. Объединение этих подходов открывает новые возможности для исследований в естественных науках и инженерии. Основное внимание статьи уделяется применению CFD в биомиметике, включая аспекты движения, уменьшения сопротивления и снижения шума, а также рассматриваются существующие проблемы и перспективы развития в этой области.

В работе [25] рассматривается применение биомиметического движения в автономных подводных аппаратах AUV, которое стало популярным благодаря его многофункциональности и широкому спектру применения, включая глубоководную разведку и обслуживание подводной инфраструктуры. Традиционные методы движения AUV с использованием винтов создают проблемы, такие как высокое энергопотребление, повышенное сопротивление и шум. Поэтому исследователи изучают маневры водных существ для разработки более эффективных AUV, которые используют волнообразные движения тела и хвоста, что улучшает их энергоэффективность и маневренность.

Также обсуждается техника движения с хвостовым плавником, которая обеспечивает высокую эффективность, маневренность и устойчивость в сложных условиях. Исследователи провели численное моделирование, чтобы понять, как различные параметры модели (частота, амплитуда, соотношение сторон) влияют на характеристики движения и эффективность. Также представлены схемы моделей махового гидрокрыла и краткое резюме различных гидрокрыльев, описывающих их конструкции и методы моделирования.

В работе [26] была разработана модель взаимодействия жидкостей и структур FSI (fluid structure interaction), которая позволяет имитировать поведение рыбы при плавании, используя коммерческое программное обеспечение CFD. Эта модель помогает в создании численных симуляций для биомиметических подводных аппаратов. Chung и его коллеги [27] применили FSI для анализа движения плавников рыб, а Wright и коллеги [28] изучили влияние материалов хвостовых плавников на гидродинамические характеристики. В работе [28] использовали CFD для моделирования биомиметических автономных подводных аппаратов AUV, а в работе [29] авторы исследовали гидродинамические характеристики тунца для улучшения эффективного движения. Они также обратили внимание на поведение стайных рыб, анализируя их гидродинамические характеристики в различных режимах. Эти исследования подчеркивают важность комплексного подхода к пониманию и оптимизации гидродинамических свойств подводных транспортных средств.

В исследовательской работе [30] так же, отмечается, что скаты используют уникальную технику плавания, взмахивая грудными плавниками, что обеспечивает им высокую маневренность и эффективность. Их обтекаемая форма и кожа с низким сопротивлением способствуют этому. Исследователи используют вычислительную гидродинамику для моделирования этих биологических характеристик, чтобы понять динамику батоидов.

Что касается группового плавательного поведения и его гидродинамических эффектов, Gao и другие [31] провели углубленное исследование коллективного плавательного поведения батоидов и тунцов, что позволило получить новое представление о гидродинамических эффектах индивидуального и скоординированного плавательного поведения. Исследуемая модель ската манта изображена на рис. 10, на рис. 11 представлена структура волнения, а на рис. 12 – распределение давления на тело ската.

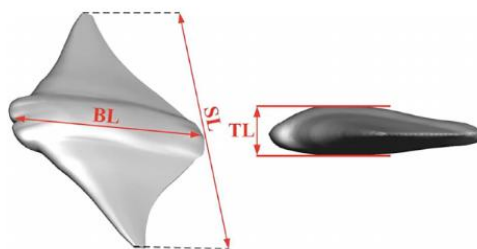


Рис. 10. Модель манты [31]

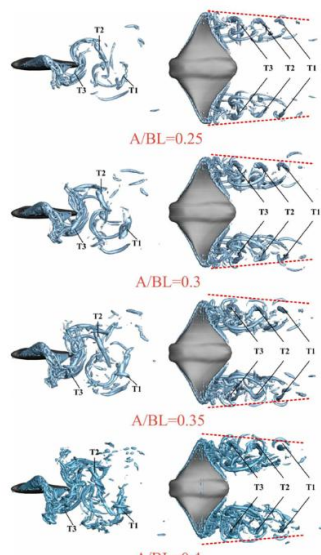


Рис. 11. Трехмерная структура следа при разных амплитудах колебания плавников манты [31]

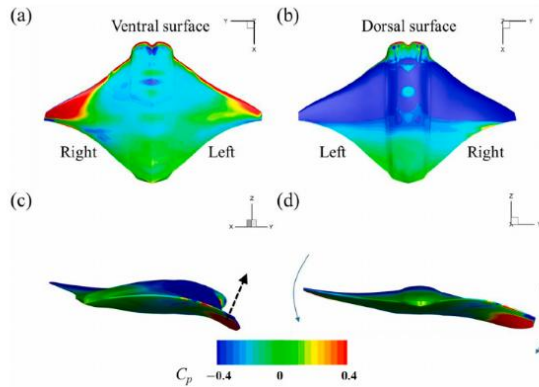


Рис. 12. Распределение давления на теле ската: а) распределение давления на вентральной поверхности; б) распределение давления на дорсальной поверхности; в) левый и правый плавники складываются в горизонтальной плоскости; г) компонент, который формирует крутящий момент [31]

Кроме того, Menzer и другие в работе [32] и Safari и его коллеги в [33] расширили исследование сложных нестационарных вихревых структур, возникающих в результате машущих движений батондов, с помощью численного моделирования.

Дельфины являются замечательными пловцами благодаря своей высокой эффективности и уникальному дорсовентральному механизму движения, который также используется другими водными млекопитающими. Исследователи стремятся понять и имитировать этот механизм, так как это может привести к созданию высокоэффективных подводных аппаратов. Важную роль в эффективности плавания дельфинов играют координация их тела с грудными, спинными и хвостовыми плавниками, что придаёт им ловкость и силу.

Недавние исследования, вдохновленные дельфинами, добились успехов в моделировании их движений. Например, в работе [34] разработали точную модель маневренности дельфина-робота, а в работе [35] улучшили управление роботом, введя модель колебаний грудного плавника с эллиптической траекторией. Ву и его команда [36–38] создали бионических дельфиноподобных роботов, объединив механические и подводные планеры, что позволило значительно улучшить их маневренность и скорость. Эти разработки демонстрируют возможности эффективного дизайна подводных роботов на основе характеристик движения дельфинов, что отображено на рис. 13, 14.

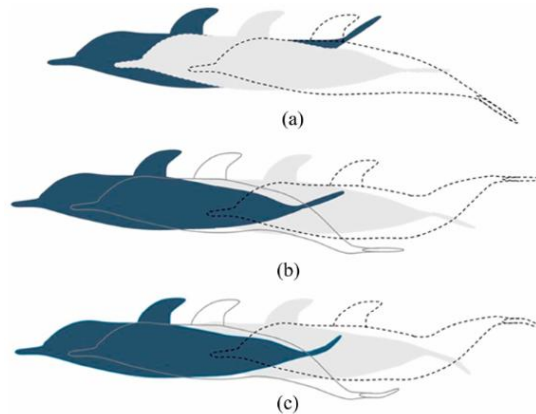


Рис. 13. Позы трех режимов движения дельфинов: а) одноступенчатая двигательная установка; б) двухступенчатая двигательная установка в) многоступенчатая тяга [36]

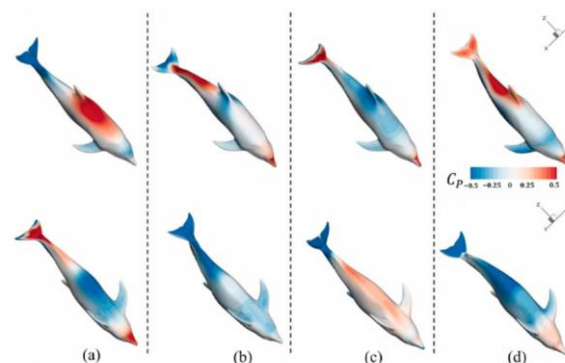


Рис. 14. Поверхностный контур коэффициента давления на колеблющемся теле дельфина [37]

Дельфины и скаты не единственные примеры, на которые ориентируются создатели биомиметических подводных аппаратов. Эффективность подводного движения морских организмов, таких как кальмары, значительно повышается благодаря их обтекаемым формам и уникальным методам передвижения. Кальмары используют реактивное движение, которое активируется для уклонения от хищников, обеспечивая высокую скорость и маневренность. Эта реактивная система, в сочетании с гидродинамическими характеристиками их тела, минимизирует сопротивление и улучшает эффективность плавания [39]. Кальмары могут ускоряться и ориентироваться в сложных условиях глубокого океана, что вызывает научный интерес к изучению их движений. В подводной мягкой робототехнике принципы реактивного движения кальмаров рассматриваются как инновация, способная улучшить конструкции роботов. Исследования показывают, что увеличение диаметра сопла реактивного движителя может значительно повысить его эффективность, что важно для оптимизации таких систем в подводных устройствах [40, 41].

Дальнейшие исследования привели к созданию улучшенной модели кальмара, которая требует минимальной тяги во время ускорения, что полезно для проектирования эффективных подводных двигательных систем. Использование большего диаметра сопла, меньших углов атаки и отсутствия плавников может повысить эффективность движения кальмара на 80% [42].

В работе [43] была разработана 2D-система, имитирующая плавание кальмара, которая показала, что более высокие числа Рейнольдса обеспечивают большую движущую силу и эффективность благодаря вихревым процессам. В более турбулентной среде увеличение числа Рейнольдса или уменьшение размера сопла ускоряет формирование неустойчивостей.

Также была создана 3D-модель реактивного движения с гибким корпусом и управляющим соплом, демонстрирующая, что изогнутые сопла эффективно управляют вектором тяги, в то время как вязкое трение зависит от числа Рейнольдса. Численный анализ показал, как скорость струи влияет на образование вихревых колец и производительность, что дает полезные данные для проектирования биомиметических подводных роботов.

Биомиметические технологии снижения сопротивления активно применяются в проектировании подводных аппаратов для уменьшения воздействий сил сопротивления, которые могут снижать скорость, увеличивать потребление энергии и влиять на устойчивость. Эти технологии имитируют формы и механизмы водных существ, таких как кожа акул и движения рыб, что ведет к улучшению навигационной эффективности.

Некоторые исследования достигли значительного снижения сопротивления, например, в исследовании [44] авторы смогли уменьшить сопротивление на 25% при с помощью модели кальмара. Разработанные методы, вдохновленные морскими существами, включая поверхность на основе рыбы-собаки и конструкции с конусообразными выступами, также показали обещающие результаты в снижении сопротивления и улучшении адгезии.

Оценка гидродинамических характеристик бионических форм. В работе [45] отмечается, что бионический дизайн, основанный на формах тел и отдельных элементах летающих и водоплавающих животных, нашел применение в авиации и судостроении, начиная от малых дронов и заканчивая супертяжелыми транспортными средствами. Представлен краткий обзор наиболее интересных технических решений, а также проанализированы принципы высокой эффективности плавания и полета в природе. С использованием метода конечных элементов был проведен сравнительный анализ гидромеханических параметров различных видов рыб и рассчитаны их аэродинамические характеристики. Также предложены модификации существующих аэродинамических профилей, которые могут способствовать улучшению их обтекаемости [45].

Как пример успешного использования биомиметического дизайна в авиации приводится транспортный самолет Beluga фирмы Airbus (рис. 15,а), форма корпуса которого была рассчитана на основе изучения гидродинамических свойств тела кита белухи (рис. 15,б). Китовидная форма была использована и в дизайне подводного исследовательского дрона EchoVoyager фирмы Boeing (рис. 16).



Рис. 15. Самолет Beluga (а) и его прототип кит белуха (б) [45]



Рис. 16. Подводный дрон EchoVoyager фирмы Boeing [45]

В работе [46] отмечается, что для подводных движущихся аппаратов в последние три десятилетия остро встала проблема энергетической эффективности и акустической бесшумности. Решение этих проблем неразрывно связано с решением задач динамики и виброакустики, возникающих при обтекании подводных тел потоком жидкости. К таким задачам относят задачу возникновения пульсаций давления и скорости, распределённых по поверхности объекта, а также шума и вибраций, вызванных этими пульсациями.

Для создания энергоэффективных и малошумных подводных движущихся роботов необходимо создание методов воздействия на структуру пристеночных течений и форму аэродинамических поверхностей робота с целью снижения его поверхностного трения, а

также полного сопротивления. В работе [46] представлена разработка испытательного стенда для тестирования основных элементов системы управления автономного необитаемого подводного аппарата с изменяемой геометрией тела, где в виде отдельных модулей размещены подсистема переменной плавучести, подсистема изменения углов атаки, крена и тангажа, а также подсистема изменения геометрии на основе пневматических мускулов.

Проблемы и перспективы в области биомиметических технологий. Коммерческая жизнеспособность технологий, включая расходы на исследования и разработки, производство и обслуживание, требует детального анализа. Потенциальные рынки, такие как оборонные задачи и океанографические исследования, открывают разнообразные возможности для их применения.

Технология биомиметического движения в проектировании подводных транспортных средств основывается на уникальных двигательных системах морских существ, таких как рыбы и дельфины. Однако расчет гидродинамики сталкивается с трудностями при точном моделировании сложных процессов, таких как динамическое движение и ритмические колебания, что требует высокой вычислительной точности и значительных ресурсов.

Кроме того, сложные механические конструкции и системы управления необходимы для воспроизведения природных движений, что может сделать их менее эффективными при изменении условий. Несмотря на сложности, достижения в вычислительных технологиях, в материаловедении, а также в интеграции искусственного интеллекта, они открывают новые перспективы для улучшения биомиметических систем. Сотрудничество между различными дисциплинами, такими как биология и робототехника, также важна для успешной разработки этих технологий.

Будущее биомиметического движения требует инновационных решений и внимания к устойчивости, что может привести к снижению энергопотребления и шумового загрязнения. В экономическом контексте данная область находится на этапе активного развития, предлагая экологически чистую альтернативу традиционным методам.

В области биомиметического снижения сопротивления и шума подводных транспортных средств исследователи часто сосредотачиваются на особенностях отдельных морских существ, таких как акулы. Несмотря на то, что эти аспекты часто изучаются отдельно, между ними существует связь.

Основная проблема заключается в недостаточном понимании природных характеристик и в том, что результаты моделирования не всегда совпадают с наблюдениями из-за сложности факторов, таких как граничные условия жидкости и физиологические свойства. Также точность моделирования гидродинамики зависит от выбора модели турбулентности, что может приводить к неточностям в прогнозах. Высокие вычислительные затраты и время, необходимые для создания сложных 3D-моделей, замедляют процесс проектирования и оптимизации. Кроме того, существующие модели часто фокусируются на отдельных аспектах, что затрудняет эффективное решение задач, связанных с шумом, поскольку подводные транспортные средства создают различные типы шума.

Несмотря на текущие трудности, применение CFD в биомиметическом снижении сопротивления и шума имеет большие перспективы. Ожидается, что дальнейшее развитие методологий CFD позволит лучше моделировать сложные взаимодействия и приближаться к реальным условиям, что повысит точность и эффективность подводных транспортных средств.

Использование искусственного интеллекта и машинного обучения может дать ощутимый толчок развитию области, улучшая функции снижения сопротивления и шума с помощью алгоритмов на основе больших данных. Необходимы также обширные экспериментальные исследования для проверки и уточнения вычислительных моделей.

Целостный подход к оптимизации дизайна, объединяющий различные дисциплины, позволит повысить производительность подводных аппаратов. В целом, несмотря на существующие проблемы, область вычислительной гидродинамики в биомиметическом дизайне вскоре может достичь значительных успехов, что приведет к более эффективным и инновационным морским системам.

Заключение. В данной работе был представлен краткий обзор некоторых тенденций в области разработки биомиметических подводных аппаратов. Была отмечена актуальность задачи, указаны преимущества биомиметических конструкций над существующими механическими аналогами. В зависимости от типа движения были описаны рыбоподобные аппараты, также головоногие, использующие реактивную тягу. Были анализированы движения этих беспилотных аппаратов с точки зрения вычислительной гидродинамики, с учетом турбулентности. Рассмотрены примеры бионического дизайна в судостроении, выделены проблемы и перспективы развития биомиметических технологий. Можно отметить, что в перспективе биомиметика, исследующая морфологию и функции природных организмов, будет всё активнее использоваться создания автономных беспилотных подводных аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Navy develops “Ghost Swimmer” drone that looks like a shark. Seriously. — <https://www.csmonitor.com/USA/Military/2014/1216/Navy-develops-GhostSwimmer-drone-that-looks-like-a-shark.-Seriously> (дата обращения: 24.10.2024).
2. Szymak P. Research on biomimetic underwater vehicles undertaken at Institute of Electrical Engineering and Automatics // *Maritime Technical Journal*. — 2016. — Vol. 206 (3). — P. 107-119. — DOI: 10.5604/0860889X.1224752.
3. Malec M., Morawski M., Szymak P., Trzmiel A. Analysis of Parameters of Traveling Wave Impact on the Speed of Biomimetic Underwater Vehicle // *Solid State Phenomena*. — 2014. — Vol. 210. — P. 273-279.
4. Szymak P., Praczyk T., Naus K., Szturomski B., Malec M., Morawski M. Research on biomimetic underwater vehicles for underwater ISR // *Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR VII*. — SPIE, 2016. — Vol. 9831. — P. 126-139. — DOI: 10.1117/12.2225587.
5. Бочаров А.Ю. Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом // *Подводные исследования и робототехника*. — 2006. — № 2. — С. 36-52.
6. Яцун С.Ф., Лушников Б.В., Казарян К.Г., Ворочаева Л.Ю., Ворочаев А.В. Конструктивные особенности бионического робота-рыбы // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии*. — 2017. — № 2 (23). — С. 94-102.
7. Яцун С.Ф., Королёв В.И., Бондырев В.Е., Лушников Б.В. Развитие малых и средних автономных необитаемых подводных аппаратов на основе бионических (рыбоподобных) принципов движения для решения задач подразделений специального назначения ВМФ РФ // *Известия ЮФУ. Технические науки*. — 2019. — № 1 (203). — С. 98-109. — DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-98-109.
8. Щур Н.А., Митин И.В., Коротаев Р.А., Миронов В.И., Казанцев В.Б. Экспериментальное исследование и численное моделирование гидродинамики рыбоподобного подводного робота // *Робототехника и техническая кибернетика*. — 2023. — Т. 11, № 1. — С. 40-44. — DOI: 10.31776/RTCJ.11105.
9. Аббасов И.Б., Тихомиров С.А. Обзор некоторых современных автономных биомиметических подводных аппаратов // *Cifra. Машиностроение*. — № 3 (4). — DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.4.1>.
10. Ren K., Yu J. Research status of bionic amphibious robots: A review // *Ocean Engineering*. — 2021. — Vol. 227. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108862.
11. He Y., Xie Y., Pan G. [et al.]. Depth and Heading Control of a Manta Robot Based on S-Plane Control // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2022. — Vol. 10. — P. 1698. — DOI: 10.3390/jmse10111698.
12. Hasan K. et al. Oceanic Challenges to Technological Solutions: A Review of Autonomous Underwater Vehicle Path Technologies in Biomimicry, Control, Navigation and Sensing // *IEEE Access*. — 2024. — P. 46202-46231. — DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3380458.
13. Won-Shik Chu, Kyung-Tae Lee, Sung-Hyuk Song. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators // *International journal of precision engineering and manufacturing*. — 2012. — Vol. 13. — P. 1281-1292. — DOI: 10.1007/s12541-012-0171-7.
14. Fong-Chen Chiu, Jenhwa Guo, Ji-Gang Chen, Yen-Hwa Lin. Dynamic characteristic of a biomimetic underwater vehicle // *Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology*. — 2002. — No. 1, Sec. 4. — DOI: 10.1109/UT.2002.1002422.
15. Rui Wang, Shuo Wang, Yu Wang, Long Cheng, and Min Tan. Development and Motion Control of Biomimetic Underwater Robots: A Survey // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*. — 2022. — Vol. 52, Issue 2. — P. 833-844. — DOI: 10.1109/TSMC.2020.3004862.
16. Haimo Bao, Yan Zhang, Meiping Song, Qiao Kong, Xiaohui Hu. A review of underwater vehicle motion stability // *Ocean Engineering*. — 2023. — 287. — 115735.

17. Yu Wang, Chong Tang, Shuo Wang, Long Cheng, Rui Wang, Min Tan, and Zengguang Hou. Target Tracking Control of a Biomimetic Underwater Vehicle Through Deep Reinforcement Learning // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2022. – Vol. 33, Issue: 8. – P. 3741-3752. – DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3054402.
18. Serchi F.G., Arienti A., Laschi C. Biomimetic Vortex Propulsion: Toward the New Paradigm of Soft Unmanned Underwater Vehicles // IEEE/ASME Transactions On Mechatronics. – 2013. – Vol. 18 (2). – P. 204-2015.
19. Горюнов Д.С., Каримов Т.И., Каримов А.И., Рыбин В.Г., Колев Г.Ю. Проектирование рыбоподобного биоморфного движителя // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2023. – Т. 1. – С. 97-100.
20. Chunlin Zhou and K. H. Low. Design and Locomotion Control of a Biomimetic Underwater Vehicle With Fin PropulsionMember // IEEE/ASME Transactions on mechatronics. – 2012. – Vol. 17 (1).
21. Jenhwa Guo. Maneuvering and control of a biomimetic autonomous underwater vehicle // Auton Robot. – 2009. – Vol. 26. – P. 241-249. – DOI: 10.1007/s10514-009-9117-z.
22. Praczyk T. Neural collision avoidance system for biomimetic autonomous underwater vehicle // Soft Computing. – 2020. – Vol. 24. – P. 1315-1333. – <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03969-6>.
23. Colgate J.E., Lynch K.M. Mechanics and Control of Swimming: A Review // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2004. – Vol. 29 (3). – P. 660-673.
24. Kim H., Lee B., Kim R. A Study on the Motion Mechanism of Articulated Fish Robot // The 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Proceedings, Harbin (China), 2007. – P. 485-490.
25. Zhang Z., Wang Q., Zhang S. et all. Review of Computational Fluid Dynamics Analysis in Biomimetic Applications for Underwater Vehicles // Biomimetics. – 2024. – Vol. 12 (2). – 33 p. – <https://doi.org/10.3390/biomimetics9020079>.
26. Fouladi K., Coughlin D.J. CFD Investigation of Trout-Like Configuration Holding Station near an Obstruction // Fluids. – 2021. – Vol. 6. – P. 204-230.
27. Chung H., Cao S., Philen M., Beran P.S., Wang K.G. CFD-CSD Coupled Analysis of Underwater Propulsion Using a Biomimetic Fin-and-Joint System // Comput. Fluids. – 2018. – Vol. 172. – P. 54-66.
28. Wright M., Luo Y., Xiao Q., Post M., Gorma W., Durrant A., Yue H. CFD-FSI Analysis on Motion Control of Bio-Inspired Underwater AUV System Utilizing PID Control // In Proceedings of the 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020. – P. 1-6.
29. Li R., Xiao Q., Liu Y., Li L., Liu H. Computational Investigation on a Self-Propelled Pufferfish Driven by Multiple Fins // Ocean Eng. – 2020. – 197. – 106908.
30. Gao P., Huang Q., Pan G., Song D., Gao Y. Research on Swimming Performance of Fish in Different Species // Phys. Fluids. – 2023. – 35. – 061909.
31. Luo Y., Xu T., Huang Q., Hou Z., Pan G. A Numerical Investigation on Thrust and Torque Production of a Batoid Fish with Asymmetric Pectoral Fins Flapping // Ocean Eng. – 2022. – Vol. 263. – P. 112-132.
32. Menzer A., Li C., Fish F., Gong Y., Dong H. Modeling and Computation of Batoid Swimming Inspired Pitching Impact on Wake Structure and Hydrodynamic Performance // In Proceedings of the Vol. 2: Multiphase Flow (MFTC); Computational Fluid Dynamics (CFDTC); Micro and Nano Fluid Dynamics (MNFDTTC), Toronto, Canada, 2022; American Society of Mechanical Engineers: New York, NY, USA; p. V002T05A003.
33. Safari H., Abbaspour M., Darbandi M. Numerical Study to Evaluate the Important Parameters Affecting the Hydrodynamic Performance of Manta Ray's in Flapping Motion // Appl. Ocean Res. – 2021. – Vol. 109. – 102559.
34. Xue Z., Li L., Song Y. The Research of Maneuverability Modeling and Environmental Monitoring Based on a Robotic Dolphin // Appl. Bionics Biomech. – 2021. – 4203914.
35. Cao J., Li Z., Zhou X., Xia D. Numerical Exploration on Pitching Motion of Robotic Dolphin Realized by Pectoral Fin // In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Takamatsu, Japan, 8–11 August 2021; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2021. – P. 628-632.
36. Wu Z., Yu J., Yuan J., Tan M. Analysis and Verification of a Miniature Dolphin-like Underwater Glider // Industrial Robot: An International Journal. – 2016. – 43.6. – P. 628-635.
37. Wu Z., Yang X., Zhou C., Yuan J., Yu J. Dynamics Modeling and Simulation for a Gliding Robotic Dolphin // In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Qingdao, China, 3–7 December 2016; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2016. – P. 829-834.
38. Wu Z., Yu J., Yuan J., Tan M., Zhang J. Mechatronic Design and Implementation of a Novel Gliding Robotic Dolphin // In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, China, 6–9 December 2015; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2015. – P. 267-272.

39. Zhang X., Wang J., Wan D. CFD Investigations of Evolution and Propulsion of Low-Speed Vortex Ring // *Ocean Engineering*. – 2020. – 195. – 106687.
40. Bi X., Zhu Q. Dynamics of a Squid-Inspired Swimmer in Free Swimming // *Bioinspiration & Biomimetics*. – 2019. – 15. – 016005.
41. Anderson E.J.; Grosenbaugh M.A. Jet Flow in Steadily Swimming Adult Squid // *J. Exp. Biol.* – 2005. – 208. – P. 1125-1146.
42. Olcay A.B., Malazi M.T. The Effects of a Longfin Inshore Squid's Fins on Propulsive Efficiency during Underwater Swimming // *Ocean Engineering*. – 2016. – 128. – P. 173-182.
43. Luo Y., Xiao Q., Zhu Q., Pan G. Pulsed-Jet Propulsion of a Squid-Inspired Swimmer at High Reynolds Number // *Phys. Fluids*. – 2020. – 32. – 111901.
44. Malazi T.M. Design Optimization of a Longfin Inshore Squid Using a Genetic Algorithm // *Ocean Engineering*. – 2023. – 279. – 114583.
45. Дуриляк В.В., Кизилова Н.Н., Корякина О.А., Халин А.И., Шишов Н.И. Оценка аэродинамических характеристик бионических форм // *Механика. Исследования и инновации*. – 2021. – Вып. 14. – С. 21
46. Галушко И.Д., Салмина В.А. и Макарьян Г.М. Разработка испытательного стенда для тестирования системы управления подводного робота с изменяемой геометрией корпуса // *Динамика и виброакустика*. – 2019. – Т. 5, № 3. – DOI: 10.18287/2409-4579-2019-5-3-6-13.

REFERENCES

1. Navy develops “Ghost Swimmer” drone that looks like a shark. Seriously. Available at: <https://www.csmonitor.com/USA/Military/2014/1216/Navy-develops-GhostSwimmer-drone-that-looks-like-a-shark.-Seriously> (accessed 24 October 2024).
2. Szymak P. Research on biomimetic underwater vehicles undertaken at Institute of Electrical Engineering and Automatics, *Maritime Technical Journal*, 2016, Vol. 206 (3), pp. 107-119. DOI: 10.5604/0860889X.1224752.
3. Malec M., Morawski M., Szymak P., Trzmiel A. Analysis of Parameters of Traveling Wave Impact on the Speed of Biomimetic Underwater Vehicle, *Solid State Phenomena*, 2014, Vol. 210, pp. 273-279.
4. Szymak P., Praczyk T., Naus K., Szturomski B., Malec M., Morawski M. Research on biomimetic underwater vehicles for underwater ISR, *Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR VII*. SPIE, 2016, Vol. 9831, pp. 126-139. DOI: 10.1117/12.2225587.
5. Bocharov A.Yu. Sovremennyye tendentsii v razvitii miniaturnykh podvodnykh apparatov i robotov za rubezhom [Modern trends in the development of miniature underwater vehicles and robots abroad], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2006, No. 2, pp. 36-52.
6. Yatsun S.F., Lushnikov B.V., Kazaryan K.G., Vorochaeva L.Yu., Vorochaev A.V. Konstrukivnye osobennosti bionicheskogo robota-ryby [Design features of the bionic robot-fish], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii* [Bulletin of the South-West State University. Series Engineering and Technology], 2017, No. 2 (23), pp. 94-102.
7. Yatsun S.F., Korolev V.I., Bondyrev V.E., Lushnikov B.V. Razvitie malyykh i srednikh avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov na osnove bionicheskikh (rybopodobnykh) printsiptov dvizheniya dlya resheniya zadach podrazdeleniy spetsial'nogo naznacheniya VMF RF [Development of small and medium autonomous unmanned underwater vehicles based on bionic (fish-like) principles of motion to solve problems of special forces units of the Russian Navy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 98-109. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-98-109.
8. Shchur N.A., Mitin I.V., Korotaev R.A., Mironov V.I., Kazantsev V.B. Eksperimental'noe issledovanie i chislennoe modelirovanie gidrodinamiki rybopodobnogo podvodnogo robota [Experimental study and numerical modeling of the hydrodynamics of a fish-like underwater robot], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2023, Vol. 11, No. 1, pp. 40-44. DOI: 10.31776/RTCJ.11105.
9. Abbasov I.B., Tikhomirov S.A. Obzor nekotorykh sovremennykh avtonomnykh biomimeticheskikh podvodnykh apparatov [Review of some modern autonomous biomimetic underwater vehicles], *Cifra. Mashinostroenie* [Cifra. Mechanical Engineering], No. 3 (4). DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2024.4.1>.
10. Ren K., Yu J. Research status of bionic amphibious robots: A review, *Ocean Engineering*, 2021, Vol. 227. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108862.
11. He Y., Xie Y., Pan G. [et al.]. Depth and Heading Control of a Manta Robot Based on S-Plane Control, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10, pp. 1698. DOI: 10.3390/jmse10111698.
12. Hasan K. et al. Oceanic challenges to technological solutions: a review of autonomous underwater vehicle path technologies in biomimicry, control, navigation and sensing, *IEEE Access*, 2024, pp. 46202-46231. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3380458.

13. Won-Shik Chu, Kyung-Tae Lee, Sung-Hyuk Song. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators, *International journal of precision engineering and manufacturing*, 2012, Vol. 13, pp. 1281-1292. DOI: 10.1007/s12541-012-0171-7.
14. Fong-Chen Chiu, Jenhwa Guo, Ji-Gang Chen, Yen-Hwa Lin. Dynamic characteristic of a biomimetic underwater vehicle, *Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology*, 2002, No. 1, Sec. 4. DOI: 10.1109/UT.2002.1002422.
15. Rui Wang, Shuo Wang, Yu Wang, Long Cheng, and Min Tan. Development and Motion Control of Biomimetic Underwater Robots: A Survey, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2022, Vol. 52, Issue 2, pp. 833-844. DOI: 10.1109/TSMC.2020.3004862.
16. Haimo Bao, Yan Zhang, Meiping Song, Qiao Kong, Xiaohui Hu. A review of underwater vehicle motion stability, *Ocean Engineering*, 2023, 287, 115735.
17. Yu Wang, Chong Tang, Shuo Wang, Long Cheng, Rui Wang, Min Tan, and Zengguang Hou. Target Tracking Control of a Biomimetic Underwater Vehicle Through Deep Reinforcement Learning, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, Vol. 33, Issue: 8, pp. 3741-3752. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3054402.
18. Serchi F.G., Arienti A., Laschi C. Biomimetic Vortex Propulsion: Toward the New Paradigm of Soft Unmanned Underwater Vehicles, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 2013, Vol. 18 (2), pp. 204-215.
19. Goryunov D.S., Karimov T.I., Karimov A.I., Rybin V.G., Kolev G.Yu. Proektirovanie rybopodobnogo biomorfnoho dvizhitelya [Design of a fish-like biomorphic propulsor], *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [International Conference on Soft Computing and Measurements], 2023, Vol. 1, pp. 97-100.
20. Chunlin Zhou and K. H. Low. Design and Locomotion Control of a Biomimetic Underwater Vehicle With Fin Propulsion Member, *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 2012, Vol. 17 (1).
21. Jenhwa Guo. Maneuvering and control of a biomimetic autonomous underwater vehicle, *Auton Robot*, 2009, Vol. 26, pp. 241-249. DOI: 10.1007/s10514-009-9117-z.
22. Praczyk T. Neural collision avoidance system for biomimetic autonomous underwater vehicle, *Soft Computing*, 2020, Vol. 24, pp. 1315-1333. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03969-6>.
23. Colgate J.E., Lynch K.M. Mechanics and Control of Swimming: A Review, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, Vol. 29 (3), pp. 660-673.
24. Kim H., Lee B., Kim R. A Study on the Motion Mechanism of Articulated Fish Robot, *The 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Proceedings, Harbin (China)*, 2007, pp. 485-490.
25. Zhang Z., Wang Q., Zhang S. et al. Review of Computational Fluid Dynamics Analysis in Biomimetic Applications for Underwater Vehicles, *Biomimetics*, 2024, Vol. 12 (2), 33 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/biomimetics9020079>.
26. Fouladi K., Coughlin D.J. CFD Investigation of Trout-Like Configuration Holding Station near an Obstruction, *Fluids*, 2021, Vol. 6, pp. 204-230.
27. Chung H, Cao S, Philen M, Beran P.S, Wang K.G. CFD-CSD Coupled Analysis of Underwater Propulsion Using a Biomimetic Fin-and-Joint System, *Comput. Fluids*, 2018, Vol. 172, pp. 54-66.
28. Wright M., Luo Y, Xiao Q., Post M, Gorma W., Durrant A., Yue H. CFD-FSI Analysis on Motion Control of Bio-Inspired Underwater AUV System Utilizing PID Control, *In Proceedings of the 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV)*, IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020, pp. 1-6.
29. Li R., Xiao Q., Liu Y., Li L., Liu H. Computational Investigation on a Self-Propelled Pufferfish Driven by Multiple Fins, *Ocean Eng.*, 2020, 197, 106908.
30. Gao P., Huang Q., Pan G., Song D., Gao Y. Research on Swimming Performance of Fish in Different Species, *Phys. Fluids.*, 2023, 35, 061909.
31. Luo Y., Xu T., Huang Q., Hou Z., Pan G. A Numerical Investigation on Thrust and Torque Production of a Batoid Fish with Asymmetric Pectoral Fins Flapping, *Ocean Eng.*, 2022, Vol. 263, pp. 112-132.
32. Menzer A., Li C., Fish F., Gong Y., Dong H. Modeling and Computation of Batoid Swimming Inspired Pitching Impact on Wake Structure and Hydrodynamic Performance, *In Proceedings of the Vol. 2: Multiphase Flow (MFTC); Computational Fluid Dynamics (CFDTC); Micro and Nano Fluid Dynamics (MNFDTTC)*, Toronto, Canada, 2022; American Society of Mechanical Engineers: New York, NY, USA; p. V002T05A003.
33. Safari H., Abbaspour M., Darbandi M. Numerical Study to Evaluate the Important Parameters Affecting the Hydrodynamic Performance of Manta Ray's in Flapping Motion, *Appl. Ocean Res.*, 2021, Vol. 109, 102559.
34. Xue Z., Li L., Song Y. The Research of Maneuverability Modeling and Environmental Monitoring Based on a Robotic Dolphin, *Appl. Bionics Biomech.*, 2021, 4203914.

35. Cao J., Li Z., Zhou X., Xia D. Numerical Exploration on Pitching Motion of Robotic Dolphin Realized by Pectoral Fin, *In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Takamatsu, Japan, 8–11 August 2021; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2021*, pp. 628-632.
36. Wu Z., Yu J., Yuan J., Tan M. Analysis and Verification of a Miniature Dolphin-like Underwater Glider, *Industrial Robot: An International Journal*, 2016, 43.6, pp. 628-635.
37. Wu Z., Yang X., Zhou C., Yuan J., Yu J. Dynamics Modeling and Simulation for a Gliding Robotic Dolphin, *In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Qingdao, China, 3–7 December 2016; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2016*, pp. 829-834.
38. Wu Z., Yu J., Yuan J., Tan M., Zhang J. Mechatronic Design and Implementation of a Novel Gliding Robotic Dolphin, *In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, China, 6–9 December 2015; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2015*, pp. 267-272.
39. Zhang X., Wang J., Wan D. CFD Investigations of Evolution and Propulsion of Low-Speed Vortex Ring, *Ocean Engineering*, 2020, 195, 106687.
40. Bi X., Zhu Q. Dynamics of a Squid-Inspired Swimmer in Free Swimming, *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 15, 016005.
41. Anderson E.J., Grosenbaugh M.A. Jet Flow in Steadily Swimming Adult Squid, *J. Exp. Biol.*, 2005, 208, pp. 1125-1146.
42. Olcay A.B., Malazi M.T. The Effects of a Longfin Inshore Squid's Fins on Propulsive Efficiency during Underwater Swimming, *Ocean Engineering*, 2016, 128, pp. 173-182.
43. Luo Y., Xiao Q., Zhu Q., Pan G. Pulsed-Jet Propulsion of a Squid-Inspired Swimmer at High Reynolds Number, *Phys. Fluids.*, 2020, 32, 111901.
44. Malazi T.M. Design Optimization of a Longfin Inshore Squid Using a Genetic Algorithm, *Ocean Engineering*, 2023, 279, 114583.
45. Durshlyak V.V., Kizilova N.N., Koryakina O.A., Khalin A.I., Shishov N.I. Otsenka aerodinamicheskikh kharakteristik bionicheskikh form [Evaluation of aerodynamic characteristics of bionic forms], *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii* [Mechanics. Research and Innovation], 2021, Issue 14, pp. 21
46. Galushko I.D., Salmina V.A. i Makar'yan G.M. Razrabotka ispytatel'nogo stenda dlya testirovaniya sistemy upravleniya podvodnogo robota s izmenyaemoy geometriey korpusa [Development of a test bench for testing the control system of an underwater robot with variable body geometry], *Dinamika i vibroakustika* [Dynamics and Vibroacoustics], 2019, Vol. 5, No. 3. DOI: 10.18287/2409-4579-2019-5-3-6-13.

Гриценко Дмитрий Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: dgricenکو@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371794; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; аспирант.

Аббасов Ифтихар Балакишиевич – Южный федеральный университет; e-mail: ibabbasov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371794; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Gritsenko Dmitry Andreevich – Southern Federal University; e-mail: dgricenکو@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371794; the Department of Engineering Graphics and Computer Design; postgraduate student.

Abbasov Iftikhar Balakishievich – Southern Federal University; e-mail: ibabbasov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371794; the Department of Engineering Graphics and Computer Design; head of the Department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 629.06, 656.2

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-203-213

А.Л. Охотников

ИНТЕГРИРОВАННАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Статья описывает результаты разработки и внедрения интеллектуальной системы управления беспилотным поездом «Ласточка» на Московском центральном кольце. Особенностью беспилотной системы управления железнодорожным транспортом является: относительно высокая скорость и большая масса поездов, которые определяют длинный тормозной путь. Необходимо

решение задачи точного определения расстояния до препятствия, его идентификации и определения точного местоположения поезда на пути. Эту задачу может решать интеллектуальная система принятия решений на основе интеграции систем технического зрения и высокоточного позиционирования. Основным элементом системы управления является специализированный вычислитель, использующий технологии искусственного интеллекта. Для распознавания и идентификации препятствий система управления применяет искусственную нейронную сеть, входящую в состав программного обеспечения вычислителя. Техническое зрение работает в четырех диапазонах электромагнитных волн. Систему технического зрения можно рассматривать как информационно – измерительную систему, осуществляющую ввод и обработку информации без участия человека. Представлена структура интегрированной системы технического зрения, которая включает бортовую, инфраструктурную и мобильную системы. Эксперимент показал, что система технического зрения реагирует быстрее человека в среднем на 14 секунд. Предложен состав оборудования интегрированной высокоточной системы позиционирования, которая помимо глобальной навигационной спутниковой системы, бесплатформенной инерциальной системы и одометров, включает цифровую модель пути. Цифровая модель пути является источником точного местоположения опорных объектов инфраструктуры, относительно которых определяется позиционирование транспортного объекта с высокой точностью и основой обнуления возрастающей погрешности измерений инерциальной навигационной системы и одометра. Описаны результаты практического внедрения интеллектуальной системы управления на Московском центральном кольце.

Система автоматического управления; интеллектуальная система управления; беспилотное управление; цифровая модель пути; система технического зрения; высокоточная система позиционирования.

A.L. Okhotnikov

INTEGRATED INTELLIGENT UNMANNED VEHICLE CONTROL SYSTEM

The article describes the results of the development and implementation of the intelligent control system of the «Lastochka» unmanned train on the Moscow Central Ring. The peculiarity of the unmanned control system for railway transport is: relatively high speed and large mass of trains, which determine a long braking distance. It is necessary to solve the problem of accurate determination of the distance to the obstacle, its identification and determination of the exact location of the train on the track. This task can be solved by an intelligent decision-making system based on the integration of vision and high-precision positioning systems. The main element of the control system is a specialised computer using artificial intelligence technologies. To recognise and identify obstacles, the control system uses an artificial neural network, which is part of the computer software. Technical vision operates in four ranges of electromagnetic waves. The vision system can be considered as an information-measuring system that performs input and processing of information without human participation. The structure of the integrated vision system, which includes on-board, infrastructure and mobile systems, is presented. The experiment has shown that the vision system reacts faster than a human on average by 14 seconds. The composition of the equipment of the integrated high-precision positioning system is proposed, which in addition to global navigation satellite system, platform-free inertial system and odometers, includes a digital track model. The model is the source of the exact location of the reference infrastructure objects, relative to which the positioning of the transportation object with high accuracy is determined and the basis for zeroing the increasing error of measurements of the inertial navigation system and odometer. The results of practical implementation of the intelligent control system on the Moscow Central Circle are described.

Automatic control system; intelligent control system; unmanned control; digital track model; vision system; high-precision positioning system.

Введение. Современное общество характеризуется интенсификацией применения информационных технологий и интенсивностью транспортных потоков [1]. Основу управления сложных технических объектов и систем составляют информационные технологии и системный анализ. Большое количество сценариев и условий управления мотивирует разработку новых методов, моделей и алгоритмов. С увеличением скоростей транспортных объектов (ТО) время на принятие решений сокращается. Человек осуществляет рецепцию информации [2] на основе своего опыта и когнитивных способностей, что может приводить к задержкам в принятии решений и ошибкам восприятия информационной ситуации, особенно при высоких скоростях движения. Отсюда следует необхо-

димось минимизации человеческого фактора в условиях неопределенности и высоких рисков. Для решения этой задачи создаются новые технические, информационные и математические решения, которые позволяют оперативно и с постоянным требуемым качеством решать задачи управления при увеличении скоростей и интенсивности движения.

Постановка задачи. Целью данного исследования является рассмотрение применения современных интеллектуальных технологий в управлении для перехода на беспилотные методы управления [3–5]. Решение актуальной задачи требует разработки системы автоматического управления, методов и алгоритмов цифровой обработки информации от системы технического зрения и высокоточного позиционирования для обнаружения и идентификации объектов-препятствий, а также принятия решений для безопасного управления транспортом. В статье описывается один из таких подходов с применением системы технического зрения (СТЗ) для автоматизации сбора информации без участия человека [6, 7]. В данном контексте СТЗ можно рассматривать как информационно – измерительную систему [8]. Дополнением к этой системе предлагается использовать высокоточную систему позиционирования (ВСП) [9, 10]. Анализ указанных систем и их составляющих требует повышенного внимания и раскрывается в исследовании. Очевидно, что описание решений поставленных задач будет полезным, как для специалистов различного профиля, так и для студентов, которые предметно изучают новые научные направления о сложных технических системах и управлении ими.

Полученные экспериментальным путем данные свидетельствуют о более качественном определении препятствия средствами технического зрения, чем человеком. Быстродействие по определению объекта на пути посредством СТЗ в среднем на 14 с быстрее, чем у машиниста. На скорости 60 км/ч – это соответствует дистанции прохождения поездом 235 м.

Опытные исследования показали, что максимальное значение времени задержки внимания машиниста при детектировании препятствия по результатам замеров составило 38 с относительно реакции интегрированной СТЗ. Анализ подтверждает необходимость использования интегрированных СТЗ и технологий ВСП в системах автоматического управления движения поездов (САУ ДП).

Особенности применения интеллектуальной системы управления для подвижных транспортных объектов. Системы технического зрения подразделяют на инфраструктурные наземные (стационарные, платформенные), бортовые наземные (автомашинист, круиз-контроль), бортовые воздушные, водные, космические (автопилот, АСУ КА), интегрированные. Интеллектуальная система управления беспилотным транспортом включает четыре компонента: бортовую и инфраструктурную систему технического зрения, информационно-технологическую систему высокоточного позиционирования [9], специализированный вычислитель, централизованную систему дистанционного контроля и управления.

В настоящее время СТЗ и ВСП применяются в составе различных интеллектуальных систем управления, применяемых в воздушном, водном и автомобильном транспорте, а также в подвижных робототехнических системах.

Таблица 1

Классификация зрелости технологии САУ по видам транспорта

Вид транспорта	Технологическая зрелость	Признание технологии
Космический аппарат	Высокая	Высокая
Самолет	Высокая	Высокая
Водное судно	Высокая	Высокая
Метро	Высокая	Высокая
Автомобиль	Средняя	Средняя
Поезд	Низкая	Неизвестно

В табл. 1 приведено сравнение зрелости систем автоматического управления (САУ) на различных видах транспорта. При этом в каждой предметной области существуют свои особенности применения таких интеллектуальных систем. На железной дороге

можно выделить свои особенности: относительно высокая скорость; большая масса поездов, которая определяет длинный тормозной путь; наличие множества препятствий и помех от железнодорожной инфраструктуры; высокая ответственность за пассажиров и грузы; тяжесть последствий от возможных аварий или катастроф. В то же время слабым местом информационных технологий управления является отсутствие единых подходов к построению интеллектуальных систем управления различного назначения и, как результат, недостаточный уровень их интегрированного взаимодействия в режиме реального времени. Кроме того, с учетом быстрого развития транспортных средств и информационных технологий необходимо непрерывно совершенствовать и повышать надежность и достоверность применяемых методик и алгоритмов определения препятствий на пути движения поезда, управляемого с помощью беспилотной интеллектуальной системы управления. Автоматические интеллектуальные системы управления с использованием интегрированных СТЗ и ВСП на открытых железных дорогах работают в основном в опытно-режиме. Среди готовых решений, известных в мировой практике как проекты по созданию беспилотных интеллектуальных транспортных систем, например, *Thameslink*, *Crossrail*, *Digital S-Bahn*, *AutoHaul*, *VAL*, *ATOMIC*, *Mail Rail* для различных типов подвижного состава в эксплуатацию приняты лишь единицы [11, 12].

Анализ проблем позволяет сформулировать цель исследования: совершенствование процесса автоматического управления поездом на основе интеграции систем технического зрения и высокоточного позиционирования с использованием современных информационных технологий, алгоритмов и математических методов, применяемых на железнодорожном транспорте.

Основная идея исследования лежит в области управления движением подвижных транспортных объектов и связана с созданием интеллектуальной автоматической системы принятия решений на основе интеграции систем технического зрения и высокоточного позиционирования, что позволит перейти к новому качеству управления с более высоким уровнем автоматизации УА4 (в соответствии с ГОСТ Р 70059-2022 [13]).

Первые отечественные системы беспилотного управления для поездов метрополитена появились в 1962-1965 годах и были построены на базе вычислительной машины на ферромагнитных элементах. Одним из первых отечественных патентов на систему автоматического управления движением поездов был разработан учеными Московского института инженеров железнодорожного транспорта в 1981 году (Авторское свидетельство № 1044524). Современные беспилотные технологии в России активно начали разрабатываться и внедряться с 2015 г., когда первые горочные локомотивы с автоматическим управлением обеспечили обработку грузовых вагонов на сортировочной станции Лужская. С 2019 г. специалистами АО «НИИАС» ведется реализация проекта «Создание системы управления движением электропоездов ЭС2Г «Ласточка» на Московском центральном кольце в автоматическом режиме».

Объектом исследования в данном проекте является беспилотный электропоезд типа «Ласточка». Первая «Ласточка» ЭС2Г-113 с установленными на заводе «Уральские локомотивы» датчиками СТЗ появилась на Московском центральном кольце в конце августа 2019 года. После проведения ряда экспериментов и подбора необходимого и достаточного количества и качества датчиков была подготовлена усовершенствованная версия электропоезда – модель ЭС2Г-136, содержащая новые разработки и решения (рис. 1).

В состав бортовой системы технического зрения вошло следующее оборудование:

- ◆ камеры визуального спектра (видеокамеры – моно и стерео);
- ◆ камеры инфракрасного спектра (тепловизоры);
- ◆ лазерные сканеры (лидары);
- ◆ ультразвуковые датчики;
- ◆ вычислитель.



Рис. 1. Расположение оборудования СТЗ на электропоезде «Ласточка» (модель ЭС2Г-136)

Функциональная схема работы бортовой СТЗ показана на рис. 2. Основной задачей которой является обнаружение препятствий, где на уровне вычислителя формируется управленческое решение на основе комплексирования сенсорных данных и идентификации препятствий [14].



Рис. 2. Блок-схема работы бортовой СТЗ для обнаружения препятствий

Следует отметить, что автономный вычислитель, установленный на подвижном объекте, является ядром системы технического зрения и всей системы беспилотного управления. Однако в силу его небольшой мощности он требует разработки относительно простых, но оперативно функционирующих алгоритмов, обрабатывающих большой объем информации с высокой скоростью. Задержка при формировании решения может привести к непоправимым последствиям на железной дороге – аварии или катастрофе.

В новой версии «Ласточки» также была предложена и высокоточная система позиционирования [15]. Состав высокоточной системы позиционирования с учетом интегрирования датчиков СТЗ и навигационной аппаратуры потребителей приведен на рис. 3.

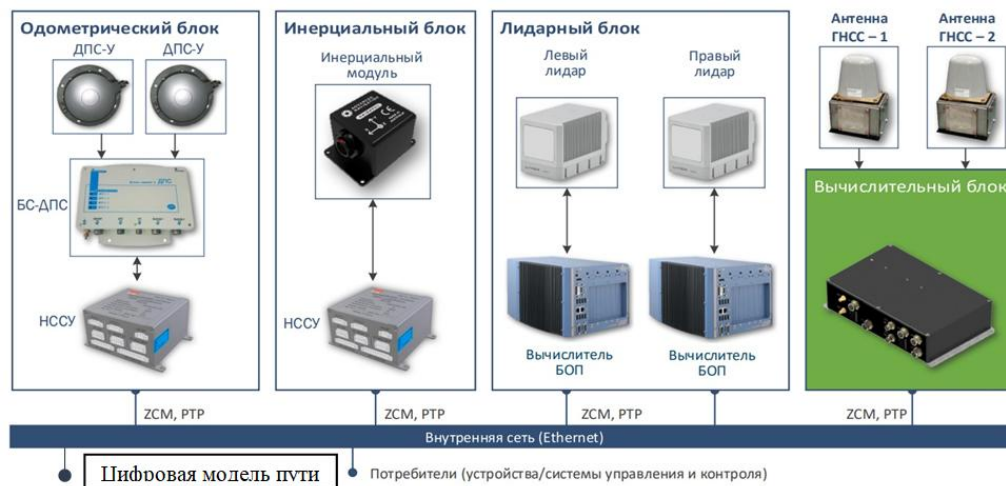


Рис. 3. Состав оборудования интегрированной ВСП

Современную задачу позиционирования автономных подвижных объектов и управления ими (особенно в условиях текущих помех) невозможно решать без использования цифровой модели пути (ЦМП) [16]. ЦМП является источником фоновой информации о точной модели маршрута движения ТО и основой обнуления возрастающей погрешности измерений инерциальной навигационной системы (НС) и одометра. К известным недостаткам инерциальных НС и одометров можно отнести накопление погрешности оцениваемых параметров с течением времени. Это ограничивает временной интервал валидности навигационных данных инерциальных НС для решения задач позиционирования. Для беспилотного ТО величина такого интервала определяется временем его прохождения под мостами, эстакадами, нахождения в тоннеле (т.е. в местах ограничения доступности использования ГНСС). Для решения данной проблемы можно применить деление участка пути на ортодромические участки – прямые кратчайшие траектории известного пути на ЦМП [17].

Такой подход описания движения ТО на ЦМП позволяет говорить о сокращении числа переменных в навигационных уравнениях, описывающих движение ТО. Аппроксимация подобными интервалами известных траекторий движения позиционируемых объектов (автострад, железных дорог, программных траекторий летательных аппаратов и пр.) при наличии электронных карт (ЦМП) является достаточно простой, однократно решаемой, вычислительной задачей [17].

Дополнительным функционалом ЦМП является навигационная информация о положении ТО на маршруте относительно опорных объектов инфраструктуры, координаты которых с точностью до 5 см указаны на ЦМП. Используя данные лидара, для точного измерения расстояния как минимум до двух опорных объектов инфраструктуры, можно точно определить свое местоположение на пути, не используя сигналы глобальных навигационных спутниковых систем.

Навигационная информация позволяет описать текущую траекторию и проанализировать множество траекторий движения ТО. Она может быть статической и динамической. Статическая информация описывает положение объекта в системе ЦМП, динамическая информация позволяет рассчитать характеристики движения, из которых важнейшей является текущий тормозной путь.

Необходимо различать две системы позиционирования. Система с ЦМП, которая создается независимо геодезистами на предварительной стадии формирования «цифрового двойника» местности. Она включает только координирование. Вторая система позиционирования подвижного объекта реализуется на подвижном объекте за счет применяемых и согласованных технических средств, включая СТЗ. Она позволяет осуществлять определение координат и скорости объекта, а также расчет дистанции до ближайших объектов, включая препятствия.

Совокупность навигационных параметров и данных о ЦМП на порядок лучше обеспечивает повышение точности позиционирования подвижного объекта с учетом имеющихся погрешностей и пропусков входных данных. ЦМП является источником координатной информации подвижных объектов, а также позволяет вычислять расстояния до других подвижных объектов, которые движутся в системе ЦМП.

Цифровая модель пути должна иметь более высокую точность, чем требуемая точность позиционирования подвижного объекта в процессе движения. В используемой цифровой модели это достигается за счет предварительно проведенных геодезических работ и наличием геопространственных данных о путевом развитии путевой инфраструктуры.

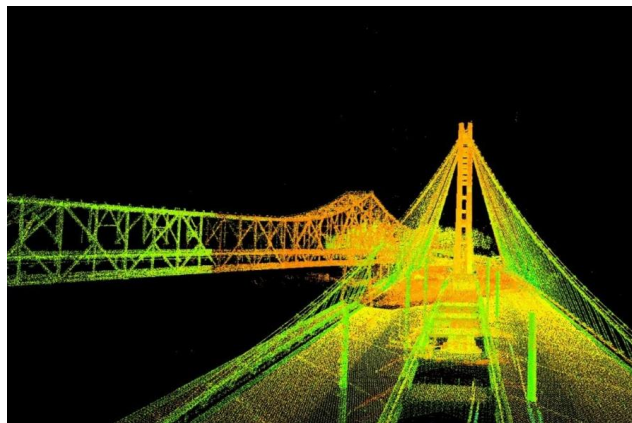


Рис. 4. Пример облака точек лидара

Еще одним из новых направлений создания «цифровых двойников» местности является визуальная одометрия на базе использования данных СТЗ электропоезда или беспилотного воздушного судна (БВС). Источником таких данных являются записи от бортовых датчиков, таких как лидары и видеокamеры. За счет фотограмметрической обработки данных видеосъемки получают множество ориентированных снимков. После измерения координат контрольных точек по ориентированным фотоснимкам (лидарным точкам – рис. 4) можно увязать данные с ЦМП путем привязки полученных результатов с координатами опорных объектов инфраструктуры железнодорожного пути.

Опорными объектами в этом случае могут являться пикетные столбики, километровые столбы, светофоры, опорные столбы контактной сети и т.д.

В настоящее время основными задачами по созданию интегрированной ВСП являются:

- ♦ оценка работы датчиков системы технического зрения в реальных условиях эксплуатации на железной дороге, с условием динамики ТО и изменениях их первоначального положения в пространстве от тряски и вибрации;
- ♦ сбор и анализ массива полученных сенсорных данных, на основе которых возможно проводить актуализацию ЦМП на основе ориентированных снимков;
- ♦ оценка изображений и выбор объектов интереса при определении и идентификации препятствий как на пути движения, так и в полосе отвода, рядом с рельсами;
- ♦ оценка качества функционирования ВСП всех подсистем и выбор валидных результатов для определения точного местоположения ТО.

Принципы построения интегрированной ВСП для беспилотного ТО основываются на особенностях параметров и технических характеристиках датчиков, используемых в информационном процессе. К таким особенностям применительно к информационному процессу относятся:

- ◆ Асинхронность данных датчиков (разных частот и в общем случае некратных), значительно осложняющая функционирование интегрированной системы.
- ◆ Изменение положения сенсоров в пространстве при движении ТО.
- ◆ Необходимость применения ЦМП.
- ◆ Необходимость контроля валидности значений от различных подсистем ВСП в процессе движения.
- ◆ Необходимость обработки данных от сигналов ГНСС в условиях высоких естественных и искусственных помех [18].
- ◆ Постепенный переход от ГНСС к инерциальным системам, визуальной и электромеханической одометрии, локальным НС.

Предложенная структура интегрированной СТЗ представлена на рис. 5.

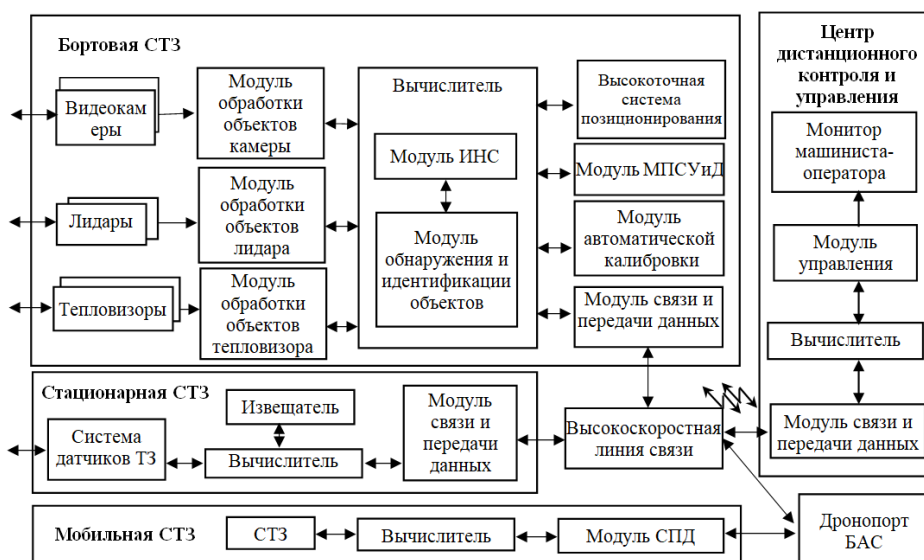


Рис. 5. Структура интегрированной системы технического зрения

Предложенная структура бортовой интегрированной СТЗ позволяет решать поставленные задачи с помощью совместного применения автономной бесплатформенной инерциальной навигационной системы, спутниковой навигационной системы, датчиков СТЗ (от различных видов СТЗ) и данных ЦМП, что обеспечивает повышение точности определения препятствий на пути движения ТО и формирования навигационных параметров, т.е. общей точности решения навигационной задачи для ТО.

Ключевое преимущество применения высокоточных систем позиционирования заключается в возможности обеспечения управления автономным ТО и уменьшении влияния человеческого фактора при обеспечении безопасности движения. Совместное использование СТЗ и ВСП становится ключевым инструментом в решении задач повышения безопасности движения и могут быть использованы в сфере интервального регулирования движения поездов.

Кроме этого, применение интегрированной ВСП для систем беспилотного управления пассажирского подвижного состава позволяет производить точную остановку поезда у знака «Остановка первого вагона» без дополнительных затрат на обеспечение оборудованием инфраструктурных объектов.

Описанную интеллектуальную систему управления за счет использования искусственной нейронной сети для идентификации препятствий и объектов на пути можно определить как «информационно-интеллектуальную» с учетом принципов кибернетического управления.

Заключение. Человек при управлении ТО осуществляет рецепцию информации и в условиях интенсификации ситуации для него возникают две проблемы: большой объем информации и многообразие сценариев управления за счет множества информационных факторов. Эти проблемы определяют исключение человека из системы управления скоростным транспортом. Для этого необходимы «технические помощники», например, система технического зрения. Такая система является специализированной прикладной системой [19], основное назначение которой является поддержка принятия решений, когда окончательное решение принимает машинист/пилот. С целью реальной оценки внешней ситуации на расстоянии, которое превышает дальность действия бортовой СТЗ, а также для участков с ограниченной видимостью и пересеченной местностью, необходимо использовать инфраструктурные СТЗ, а также мобильные СТЗ, предусматривающие использование беспилотных авиационных систем. Интегрированные системы технического зрения используются и для полностью автоматического управления, где участие человека ограничено дистанционным контролем и управлением ТО в случае нештатных ситуаций (ГОСТ Р 70059-2022). Предложенная структура и состав бортовой ВСП позволяет решать задачи точного позиционирования ТО с помощью интеграции автономной бесплатформенной инерциальной навигационной системы, спутниковой навигационной системы, одометров, датчиков СТЗ и данных цифровой модели пути, что обеспечивает повышение точности формирования параметров движения ТО и решения навигационной задачи. Для получения оптимальной структуры навигационной системы подвижного объекта, позволяющей обеспечить потребителя навигационной информацией с наибольшей эффективностью, необходимо проведение моделирования архитектуры ВСП. Данная процедура позволяет провести сравнительный анализ нескольких вариантов набора базовых компонентов навигационной системы и схем их взаимодействия [20].

Интеграция СТЗ и ВСП в интеллектуальную систему беспилотного управления, способствует совершенствованию процесса автоматического управления поездом с требуемым уровнем безопасности на железнодорожном транспорте. Описанная система прошла опытную эксплуатацию и в настоящее время функционирует на Московском центральном кольце. Сотни тысяч москвичей даже не заметили разницу между беспилотным движением и ручным управлением электропоездов. Отечественный проект, основанный на исследованиях и разработках российских специалистов, изготавливается на отечественных предприятиях и, может быть, в дальнейшем тиражироваться не только на российской железной дороге, но и в дружественных странах. По ряду параметров (длина пути, интегрирование датчиков, дальность обнаружения препятствий) она превосходит зарубежные аналоги. На разработанную в России уникальную систему беспилотного управления электропоездом получено более 10 патентов, в том числе для Евроазиатского региона. Результат достигнут за счет применения уникальных решений, новых подходов и современных технологий, применяемых в железнодорожной отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корчагин В.А., Ризаева Ю.Н. Управление транспортной системой на основе формирования транспортных потоков // Информационные технологии и инновации на транспорте. – 2015. – С. 9-11.
2. Цветков В.Я. Рецепция информации // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – 1 (13). – С. 121-129.
3. Евсюков В.В., Евсюков А.В. Интеллектуальные технологии в системах беспилотного управления транспортом // Вестник Тульского филиала Финуниверситета. – 2020. – № 1. – С. 284-286.
4. Dolgy A.I., Rozenberg I.N., Tsvetkov V.Ya. Spatial logic in process of unmanned vehicle operation // AIP Conference Proceedings. Melville, New York, United States of America, 2021. – P. 50059.
5. Susanto T. et al. Application of Unmanned Aircraft PID Control System for Roll, Pitch and Yaw Stability on Fixed Wings // 2021 International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering (ICOMITEE). – IEEE, 2021. – P. 186-190.
6. Агеев А.М. и др. Системы автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов: проблемы и пути решения // Военная мысль. – 2020. – № 4. – С. 130-136.

7. *Dhanush G. et al.* A comprehensive review of machine vision systems and artificial intelligence algorithms for the detection and harvesting of agricultural produce // *Scientific African*. – 2023. – P. e01798.
8. *Цветков В.Я.* Информационно измерительные системы и технологии в геоинформатике. – М.: МАКС Пресс, 2016. – 94 с.
9. *Иванов В.Ф., Попов П.А.* Высокоточная система позиционирования железнодорожного подвижного состава // Тр. АО «НИИАС»: Сб. статей. Т. 2. Вып. 11. – М.: Типография АО «Т 8 Издательские Технологии», 2021. – С. 179-189.
10. *Баденко В.Л., Федотов А.А.* Высокоточные системы позиционирования для сельского хозяйства // Информационно-ресурсная цифровая платформа развития сельского хозяйства: Сб. материалов конференции в рамках деловой программы международной агропромышленной выставки «Агрорусь-2020», Санкт-Петербург, 02–05 сентября 2020 года. – С. 21-25.
11. *Охотников А.Л., Волкова И.А.* Мировые тенденции развития систем автоматического управления движением поездов // Наука и технологии железных дорог. – 2023. – Т. 7, № 2 (26). – С. 23-29.
12. *Охотников А.Л.* Проекты систем технического зрения для автоматического управления движением // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 3. – С. 21-24. – DOI: 10.34649/AT.2023.3.3.003.
13. ГОСТ Р 70059-2022. Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении. Принципы построения и основные функциональные требования. – URL: https://rosgos.ru/file/gost/03/220/gost_r_70059-2022.pdf.
14. *Иванов В.Ф., Охотников А.Л., Градусов А.Н.* Алгоритм комплексирования сенсорных данных для задач автоматического управления подвижным составом // Автоматика на транспорте. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 360-371. – DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-04-360-371.
15. *Охотников А.Л., Соколов С.В.* Структура автономной интегрированной высокоточной системы позиционирования // Автоматика, связь, информатика. – 2024. – № 8. – С. 16-19. – DOI: 10.62994/AT.2024.8.8.004.
16. *Мыльников П.Д., Якушев Д.А., Иванов В.Ф.* Цифровая модель пути как основа развития систем управления и безопасности подвижного состава // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2024. – № 2 (66). – С. 24-32.
17. *Соколов С.В.* Синтез аналитических моделей пространственных траекторий и их применение для решения задач спутниковой навигации // Прикладная физика и математика. – 2013. – № 2. – С. 3-12.
18. *Лищенко Е.В., Мельник Э.В., Матвиенко А.С., Будко А.Ю.* Метод позиционирования подвижного объекта без использования данных глобальной геопривязки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 6 (242). – С. 85-96. – DOI: 10.18522/2311-3103-2024-6-85-96.
19. *Цветков В.Я.* Прикладные системы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 3. – С. 76-85.
20. *Шипов И.А., Ветошкин Е.В.* Программно-аппаратное моделирование комплексированной инерционной навигационной системы наземного объекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1 (231). – С. 31-40. – DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-31-40.

REFERENCES

1. *Korchagin V.A., Rizaeva Yu.N.* Upravlenie transportnoy sistemoy na osnove formirovaniya transportnykh potokov [Transport system management based on the formation of transport flows], *Informatsionnye tekhnologii i innovatsii na transporte* [Information technologies and innovations in transport], 2015, pp. 9-11.
2. *Tsvetkov V.Ya.* Retseptsiya informatsii [Information reception], *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii* [Educational resources and technologies], 2016, 1 (13), pp. 121-129.
3. *Evsyukov V.V., Evsyukov A.V.* Intel'lectual'nye tekhnologii v sistemakh bespilotnogo upravleniya transportom [Intelligent technologies in unmanned transport control systems], *Vestnik Tul'skogo filiala Finuniversiteta* [Bulletin of the Tula branch of the Financial University], 2020, No. 1, pp. 284-286.
4. *Dolgy A.I., Rozenberg I.N., Tsvetkov V.Ya.* Spatial logic in process of unmanned vehicle operation, *AIP Conference Proceedings. Melville, New York, United States of America*, 2021, pp. 50059.
5. *Susanto T. et al.* Application of Unmanned Aircraft PID Control System for Roll, Pitch and Yaw Stability on Fixed Wings, *2021 International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering (ICOMITEE)*. IEEE, 2021, pp. 186-190.
6. *Ageev A.M. i dr.* Sistemy avtomaticheskoy posadki bespilotnykh letatel'nykh apparatov: problemy i puti resheniya [Automatic landing systems for unmanned aerial vehicles: problems and solutions], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2020, No. 4, pp. 130-136.
7. *Dhanush G. et al.* A comprehensive review of machine vision systems and artificial intelligence algorithms for the detection and harvesting of agricultural produce, *Scientific African*, 2023, pp. e01798.
8. *Tsvetkov V.Ya.* Informatsionno izmeritel'nye sistemy i tekhnologii v geoinformatike [Information and measuring systems and technologies in geoinformatics]. Moscow: MAKS Press, 2016, 94 p.

9. Ivanov V.F., Popov P.A. Vysokotochnaya sistema pozitsionirovaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [High-precision positioning system for railway rolling stock], *Tr. AO «NIIAS»: Sb. statey* [Proceedings of JSC NIIAS: Collection of articles]. Vol. 2, Issue 11. Moscow: Tipografiya AO «T 8 Izdatel'skie Tekhnologii», 2021, pp. 179-189.
10. Badenko V.L., Fedotov A.A. Vysokotochnye sistemy pozitsionirovaniya dlya sel'skogo khozyaystva [High-precision positioning systems for agriculture], *Informatsionno-resursnaya tsifrovaya platforma razvitiya sel'skogo khozyaystva: Sb. materialov konferentsii v ramkakh delovoy programmy mezhdunarodnoy agropromyshlennoy vystavki «Agorus'-2020»*, Sankt-Peterburg, 02–05 sentyabrya 2020 goda [Information and resource digital platform for the development of agriculture: Collection of conference materials within the framework of the business program of the international agro-industrial exhibition "Agorus-2020", St. Petersburg, September 2–5, 2020], pp. 21-25.
11. Okhotnikov A.L., Volkova I.A. Mirovye tendentsii razvitiya sistem avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem poezdov [World trends in the development of automatic train control systems], *Nauka i tekhnologii zheleznikh dorog* [Science and technology of railways], 2023, Vol. 7, No. 2 (26), pp. 23-29.
12. Okhotnikov A.L. Proekty sistem tekhnicheskogo zreniya dlya avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem [Projects of technical vision systems for automatic traffic control], *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], 2023, No. 3, pp. 21-24. DOI: 10.34649/AT.2023.3.3.003.
13. GOST P 70059-2022. Sistemy upravleniya i kontrolya zheleznodorozhnogo transporta dlya perevozok passazhirov v prigorodnom soobshchenii. Printsipy postroeniya i osnovnye funktsional'nye trebovaniya [GOST P 70059-2022. Rail transport control and monitoring systems for suburban passenger transportation. Design principles and basic functional requirements]. Available at: https://rosgos.ru/file/gost/03/220/gost_r_70059-2022.pdf.
14. Ivanov V.F., Okhotnikov A.L., Gradusov A.N. Algoritm kompleksirovaniya sensorykh dannykh dlya zadach avtomaticheskogo upravleniya podvizhnym sostavom [Algorithm for integrating sensory data for rolling stock automatic control problems], *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2024, Vol. 10, No. 4, pp. 360-371. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-04-360-371.
15. Okhotnikov A.L., Sokolov S.V. Struktura avtonomnoy integrirovannoy vysokotochnoy sistemy pozitsionirovaniya [Structure of an autonomous integrated high-precision positioning system], *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], 2024, No. 8, pp. 16-19. DOI: 10.62994/AT.2024.8.8.004.
16. Myl'nikov P.D., Yakushev D.A., Ivanov V.F. Tsifrovaya model' puti kak osnova razvitiya sistem upravleniya i bezopasnosti podvizhnogo sostava [Digital track model as a basis for developing rolling stock control and safety systems], *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznikh dorog* [Bulletin of the Institute for Natural Monopolies Problems: Railway Engineering], 2024, No. 2 (66), pp. 24-32.
17. Sokolov S.V. Sintez analiticheskikh modeley prostranstvennykh traektoriy i ikh primeneniye dlya resheniya zadach sputnikovoy navigatsii [Synthesis of analytical models of spatial trajectories and their application to solving satellite navigation problems], *Prikladnaya fizika i matematika* [Applied Physics and Mathematics], 2013, No. 2, pp. 3-12.
18. Lishchenko E.V., Mel'nik E.V., Matvienko A.S., Budko A.Yu. Metod pozitsionirovaniya podvizhnogo ob"ekta bez ispol'zovaniya dannykh global'noy geoprivyazki [Method of positioning a moving object without using global georeferencing data], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 6 (242), pp. 85-96. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-6-85-96.
19. Tsvetkov V.Ya. Prikladnye sistemy [Applied systems], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos"emka* [Bulletin of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography], 2005, No. 3, pp. 76-85.
20. Shipov I.A., Vetoshkin E.V. Programmno-apparatnoe modelirovanie kompleksirovannoy inertsial'noy navigatsionnoy sistemy nazemnogo ob"ekta [Software and hardware modeling of an integrated inertial navigation system of a ground object], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 1 (231), pp. 31-40. DOI: 10.18522/2311-3103-2.

Охотников Андрей Леонидович – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»); e-mail: a.ohotnikov@vniias.ru; г. Москва, Россия; зам. начальника департамента информационных технологий – начальник отдела стратегического развития.

Okhotnikov Andrey Leonidovich – Research and Design Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunications on Railway Transport (JSC «NIIAS»); e-mail: a.ohotnikov@vniias.ru; Moscow, Russia; deputy head of the Information Technology Department – head of the Strategic Development Division.

Н.А. Жукова, И.А. Куликов**УПРАВЛЕНИЕ В АВТОНОМНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
С ПОМОЩЬЮ ОНТОЛОГИИ НАМЕРЕНИЙ**

Статья посвящена описанию возможностей управления в автономных телекоммуникационных системах при помощи онтологий намерений. В современных телекоммуникационных сетях наметились тенденции к децентрализации систем и наделению их компонентов возможностью автономной работы, при этом на уровне системы определяется бизнес-логика их работы, которая во многих случаях требует взаимодействия между несколькими или многими компонентами систем, выступающими в роли поставщиков или потребителей услуг. В статье рассматриваются автономные сети, управляемые с использованием модели TMN (от англ. Telecommunication Management Network – телекоммуникационная сеть управления), которая является многоуровневой моделью, включающей уровни управления бизнесом, услугами, телекоммуникационной сетью и ее компонентами. Для управления сетями в парадигме поставщиков и потребителей услуг международной ассоциацией, объединяющей поставщиков сервисов и их потребителей в сфере телекоммуникаций TMForum разработана концепция, основанная на использовании онтологий намерений (Intent in Autonomous Networks), позволяющих формулировать задачи управления в автономных сетях за счет определения критериев управления сетями и их элементами с точки зрения намерений участников взаимодействия по получению и предоставлению сервисов. Ввиду того, что онтология намерений описана в формате OWL, представляющим ее как семантическую сеть связанных между собой классов, в статье предложено для управления телекоммуникационными сетями использовать модель телекоммуникационной сети в форме графа знаний, который связан как с доменной онтологией телекоммуникационных сетей, так и с онтологией намерений, что позволяет обеспечить автономность компонентов сети за счет управления при помощи намерений, а использование доменной онтологии в области телекоммуникационных сетей облегчает интеграцию со сторонними поставщиками и потребителями сервисов оператора. Предложенный подход совместного использования онтологии намерений, политик и модели сети в форме графа знаний для управления телекоммуникационными сетями на бизнес-уровне является новым и его применимость показана в статье на примере реализации процесса регистрации и выполнения заявки на подключение телекоммуникационного сервиса. Рассмотренный пример показывает возможность совместного использования модели телекоммуникационной сети в форме графа знаний, построенной на основе доменной онтологии и онтологии намерений при выполнении верхнеуровневых бизнес-процессов управления автономной телекоммуникационной сетью.

Телекоммуникационная сеть; онтология намерений; автономная система; граф знаний.

N.A. Zhukova, I.A. Kulikov**CONTROL IN AUTONOMOUS TELECOMMUNICATION SYSTEMS USING
INTENT ONTOLOGY**

The article is devoted to the description of management capabilities in autonomous telecommunication systems using ontologies of intents. In modern telecommunication networks, there are trends towards decentralization of systems and endowing their components with the ability to operate autonomously, while the business logic of their operation is determined at the system level, which in many cases requires interaction between several or many system components acting as service providers or consumers. The article considers autonomous networks managed using the TMN model (from the English Telecommunication Management Network - telecommunication management network), which is a multi-level model that includes levels of business management, services, telecommunication network and its components. To manage networks in the paradigm of service providers and consumers, the international association uniting service providers and their consumers in the field of telecommunications TMForum has developed a concept based on the use of ontologies of intents (Intent in Autonomous Networks), which allow formulating management tasks in autonomous networks by defining criteria for managing networks and their elements from the point of view of the intentions of the participants in the interaction to receive and provide services. Due to the fact that the ontology of intentions is described in the OWL format, which represents it as a semantic network of interconnected classes, the article proposes to use a telecommunication network model in the form of a knowledge graph for managing telecommunication networks, which is

associated with both the domain ontology of telecommunication networks and the ontology of intentions, which ensures the autonomy of network components due to management using intentions, and the use of a domain ontology in the field of telecommunication networks facilitates integration with third-party suppliers and consumers of the operator's services. The proposed approach to jointly using the ontology of intentions, policies and a network model in the form of a knowledge graph for managing telecommunication networks at the business level is new and its applicability is shown in the article using the example of implementing the registration process and fulfilling an application for connecting a telecommunication service. The considered example shows the possibility of jointly using a telecommunication network model in the form of a knowledge graph built on the basis of a domain ontology and an ontology of intentions when performing high-level business processes for managing an autonomous telecommunication network.

Telecommunication network; intent ontology; autonomous system; knowledge graph.

Введение. Задача управления телекоммуникационными сетями средствами автономных телекоммуникационных систем является на сегодняшний день одной из самых актуальных для операторов связи. Эффективное управление сетями необходимо для обеспечения требуемого уровня качества и бесперебойного оказания услуг. Сегодня самой распространенной моделью управления, используемой в телекоммуникационных системах, является TMN (от англ. Telecommunication Management Network – телекоммуникационная сеть управления) [1]. TMN представляет собой многоуровневую структуру управления, включающую уровни управления бизнесом, услугами, телекоммуникационной сетью и ее компонентами. В последнее время наметились тенденции к децентрализации телекоммуникационных систем и наделении их компонентов способностями к автономной работе. В таких телекоммуникационных системах предусматривается определение бизнес-логики их работы на верхнем уровне, при этом реализация значительной части логики требует взаимодействия между несколькими или многими компонентами систем. В процессе взаимодействия одни компоненты-участники выступают в качестве поставщиков услуг, а другие – в качестве потребителей. Для управления автономными телекоммуникационными сетями международной ассоциацией, объединяющей поставщиков сервисов и их потребителей в сфере телекоммуникаций TMForum разработана концепция, основанная на использовании онтологий намерений (Intent in Autonomous Networks) [2]. Онтология намерений позволяет формулировать задачи управления в автономных сетях за счет определения критериев управления как сетью в целом, так и ее элементами на бизнес-уровне с точки зрения намерений участников взаимодействия по получению и предоставлению сервисов.

В предлагаемой статье представлена постановка задачи управления автономной телекоммуникационной сетью, представлен обзор подходов к управлению через политики и намерения, рассмотрена структура онтологии намерений и сценарии ее использования для управления автономными сетями. Определены основные ограничения, свойственные телекоммуникационным системам, реализующим управление сетями на основе намерений. Также приведен практический пример использования онтологии намерений при реализации функции управления компонентами автономной телекоммуникационной сети.

1. Формальная постановка задачи. Рассмотрим постановку задачи на примере телекоммуникационной сети оператора связи. Перед оператором связи стоит задача построить систему управления сетью, при условии автономности компонентов сети, что необходимо для реализации современных телекоммуникационных сервисов, требующих выполнения различных сценариев взаимодействия автономных компонентов сети одного оператора или компонентов сетей различных операторов связи. Для реализации такой системы управления требуется построить модель автономной телекоммуникационной сети оператора, в которой предусматривается взаимодействие компонентов друг с другом. Верхнеуровневые схемы управления традиционной и автономной телекоммуникационной сетью представлена на рис. 1. Система управления традиционной сетью, как правило, централизованная, она анализирует состояние компонентов сети и, в зависимости от соотношения значений параметров сети, либо непосредственно выдает управляющие воздействия через доступные интерфейсы управляемых сетевых компонентов, либо активирует предопределенные сетевые политики.

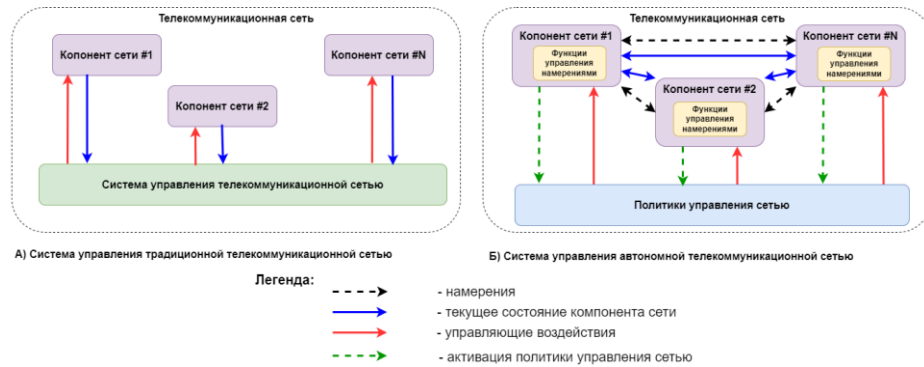


Рис. 1. Верхнеуровневая схема управления традиционной и автономной телекоммуникационной сетью

В случае автономной телекоммуникационной сети автономные компоненты обмениваются между собой намерениями и получают данные о состоянии сети. Управление сетью при этом осуществляется при помощи политик и намерений. Для автономной сети реализация функций управления сосредоточена в функциях управления намерениями, которые реализованы в каждом автономном компоненте и которые способны как формировать новые намерения, так и активировать сетевые политики или единичные управляющие воздействия. Для определения какой политика или какие управляющие воздействия должны быть применены в определенный момент времени требуется определить ценность управляющего воздействия с точки зрения получения полезных эффектов (количества и качества оказываемых сервисов) конечным потребителям [23]. Определим ценность управляющего воздействия как $V(t) = V_2(t) - V_1(t)$, где $V_2(t)$ и $V_1(t)$ соответственно конечная ценность телекоммуникационной сети с точки зрения количества и качества оказываемых конечным пользователям телекоммуникационных сервисов после реализации управляющего воздействия и до его реализации. Сами конечные ценности определяются следующим образом:

$$V_{1(2)}(t) = \max_{i(j) \in I(J)} \{W_{1(2)i(j)}(t) - \sum_{r=1}^N a_r C_{1(2)r_{i(j)}}(t)\},$$

где $W_{1i}(t)$ и $W_{2j}(t)$ – совокупные ценностные эффекты, получаемые конечными пользователями сети от оказанных сервисов, соответственно до реализации управляющего воздействия и после; I, J – множества всех возможных способов реализации ценностных эффектов в первом и втором случаях; $C_{1i}(t)$ и $C_{2j}(t)$ – расходы $i(j)$ -го ресурса оператора на достижение результатов $W_{1i}(t)$ и $W_{2j}(t)$; a_r – коэффициент приведения расхода $i(j)$ -го ресурса оператора к единицам измерения конечных эффектов для конечных пользователей; N – число видов ресурсов оператора, которые он может расходовать на реализацию управляющих воздействий. В случае, если предположить, что оператор уже обладает всеми ресурсами для оказания управляющих воздействий и его затраты можно при анализе эффективности не учитывать, то ценность управляющего воздействия может быть определена следующим образом:

$$V(t) = \max_{j \in J} \{W_{2j}(t)\} - \max_{i \in I} \{W_{1i}(t)\}.$$

Таким образом, рассматривая K вариантов достижения целевого состояния сети при помощи политик или единичных управляющих воздействий на телекоммуникационную сеть, становится возможным выбирать вариант управляющего воздействия обоснованно, на основе модели ценности. Для этого на выбранных начальных условиях функционирования сети определить ее конечную ценность $V_1(t)$, для каждой анализируемой политики или единичного управляющего воздействия $P = 1, 2, \dots, K$ определить ценность сети после его отработки сетью: $V^P(t) = V_2^P(t) - V_1(t)$. Таким образом система управления ав-

тономной сетью сможет выбирать лучшую политику или единичное управляющее воздействие руководствуясь ожидаемой целевой ценностью сети. Для решения задачи управления автономной сетью предлагается использовать онтологию намерений, разработанную TMForum, чтобы в будущем компоненты сети могли взаимодействовать между собой и с внешними потребителями сервисов, поддерживающими онтологию намерений. Совместное использование намерений и политик существенно повышает гибкость управления сетью и фактически позволяет перейти от статической модели управления к динамической.

2. Управление телекоммуникационными сетями на основе политик. В настоящее время для управления телекоммуникационными сетями широко применяются политики [3]. Политики – это технологически независимые правила, направленные на улучшение запрограммированных функций управляемых устройств путем введения интерпретируемой логики, которую можно динамически изменять без изменения базовой реализации компонентов сети. Управление на основе политик – это технология, которая позволяет упростить сложную задачу управления телекоммуникационными сетями. В рамках подхода к управлению сетями на основе политик обеспечиваются возможности формирования наборов политик, определяющих поведение сетей в различных условиях. Применение политик позволяет вносить изменения в логику работы сети без необходимости прерывания работы как управляющей системы, так и самой сети. Использование политик позволяет реализовать элементы самоуправляемости в распределенных системах, что дает возможность строить в определенной степени автономные системы и сети.

Самый простой подход к спецификации политик – задание последовательности правил, в которой каждое правило представляется в форме пары «условие-действие». Сообщество IETF (Internet Engineering Task Force – открытое международное сообщество проектировщиков, учёных, сетевых операторов и провайдеров) рассматривает политики как правила, определяющие действия, которые необходимо выполнить в ответ на определенные условия: если <условие(я)>, то <действие(я)>. Условная часть правила может представлять собой простое или сложное выражение. Часть правила, содержащая действие, описывает набор действий, которые должны выполняться, когда выполняются условия(я). IETF не определяет конкретный язык для описания сетевых политик, а использует общую объектно-ориентированную информационную модель для представления информации о политиках. Эта модель является общей моделью, определяющей структуру абстрактных классов для описания политик, что позволяет поставщикам реализовывать свои собственные наборы условий и действий, которые могут использоваться в правилах, определяющих политики.

Организация TMForum использует политики для управления телекоммуникационными сетями, в частности, для управления данными о телекоммуникационных сетях, представленных в виде агрегированных информационных объектов (Aggregated Business Elements, ABE). TMForum определяет политики как наборы правил, которые используются для управления и контроля состояния и переходов между состояниями одного или нескольких агрегированных объектов. Правила (PolicyRule) представляются в виде интеллектуальных контейнеров данных, которые определяют, как правила используются в управляемой среде, а также определяют как должны взаимодействовать управляемые объекты, к которым правила применяются. Для политик определяются события (PolicyEvent), при возникновении которых осуществляется применение правил. Правила содержат условия применения политики (PolicyCondition) и выполняемые действия (PolicyAction). Условие выполнения политики (PolicyCondition) представляет собой совокупности отдельных условий и задается как атомарный объект, представленный в виде логических выражений, которые определяют состояние управляемого объекта и/или предварительные условия, при наступлении которых должны выполняться заданные в правиле действия. Действия (PolicyAction) представляют собой совокупность отдельных действий и также являются атомарными объектами. Существует значительное сходство между формой представления PolicyConditions и PolicyActions. PolicyConditions представляются в виде: «IF <policy-condition> имеет значение TRUE», а PolicyActions в виде

«SET <action-target> TO <value>». То есть и условная часть правила, и часть, определяющая действия, имеют одну и ту же форму – {переменная, оператор, значение}, где фигурные скобки используются для обозначения кортежа. Возможно записать PolicyCondition как: ЕСЛИ <переменная> <оператор> <значение> имеет значение ИСТИНА. Например: ЕСЛИ исходный порт == 21. В этом выражении «сходный порт» является примером переменной, «==» – примером оператора, а «21» – примером значения. Аналогично, PolicyAction может быть представлен как: <оператор> <переменная> <значение>. Например: SET ToS = 5, где ToS является примером переменной, «=» – примером оператора, а «5» – примером значения. В политиках в качестве переменных могут указываться различные параметры сети, ограничений на используемые типы переменных не накладывается. Фактически, модель политик, предлагаемая TMForum, предоставляет стандартный набор переменных, с использованием которых могут определяться политики, а также предусматривает возможность создавать пользовательские переменные и устанавливать их значения, таким образом, одна и та же модель может использоваться для определения разных политик.

3. Управление автономными телекоммуникационными сетями с использованием онтологии намерений. В настоящее время TMForum разрабатывает онтологические модели намерений для организации взаимодействия участников процессов, реализуемых автономными телекоммуникационными системами. Намерение – это основа для определения приоритетов решений и действий участников, направленных на улучшение предоставляемых сервисов. Намерение определяет интересы участника – получателя услуг и обязательства участника – поставщика услуг. Это позволяет анализировать и оценивать потенциальные варианты организации взаимодействия участников с целью определения варианта, который обеспечивает наилучшие бизнес-результаты. Операции, управляемые намерениями, могут определяться для некоторой области знаний на уровне моделей, интерфейсов и архитектур.

Описание намерений позволяет автоматизировать принятие интеллектуальных решений, которые в современных автоматизированных системах, в большинстве случаев, принимаются человеком. Как правило, специалист предметной области оценивает ситуацию, в которой находится сеть, и, в зависимости от своих намерений, определяет приоритеты действий, что позволяет скорректировать работу сети в требуемом направлении. Намерение отражает, что является предпочтительным для оператора, а чего следует избегать. Определение намерений позволяет компоненту системы, с которым осуществляется взаимодействие, понять, что от него ожидают. Для оценки ситуаций, в которых могут оказываться взаимодействующие компоненты, и действий, которые они могут выполнять, используется понятие полезности. Системы управления сетями способны достаточно эффективно определять полезность возможных вариантов реализации намерений. Это дает возможность компонентам систем, потребляющим услуги, сообщать компонентам сетей, предоставляющим услуги, что для них является предпочтительным. Также системы управления могут оценивать приводят ли реализуемые компонентами действия к требуемым результатам, и, при необходимости, изменять их. Таким образом, системы управления, построенные на основе намерений, способны не просто следовать решениям, заложенным в них человеком, а могут строить решения и их перестраивать, т. е. являются в какой-то мере самоадаптивными системами. Использование механизмов управления сетями на основе намерений не исключает использования механизмов политик. Намерение участника взаимодействия может применяться для определения триггеров для применения политик, а на основе ожиданий могут строиться деревья решений, по которым система может выбрать действия, приводящие к достижению ожидаемого результата в соответствии с сформулированными намерениями и используемыми политиками. Таким образом, появляется возможность более гибко использовать политики с учетом меняющихся интересов участников, сформулированных в виде намерений. Онтологии намерений разрабатываются на этапе проектирования телекоммуникационных систем, при этом определяются объекты, описывающие намерения и эталонные значения параметров систем и сетей.

При управлении телекоммуникационными системами на основе онтологии намерений и политик, представленных в форме наборов правил, осуществляется получение оперативных данных о параметрах сети, включая данные, предоставляемые сетевой системой мониторинга, и сравнение полученных данных с эталонными значениями (диапазонами допустимых значений параметров сети), которые связаны с соответствующими экземплярами классов из онтологии намерений. Если в результате анализа фактических значений параметров определена необходимость изменения конфигурации сети (значение одного или нескольких параметров находится вне допустимого диапазона), телекоммуникационная система обращается к политикам управления сетью, которые позволяют определить управляющие воздействия, необходимые для переконфигурации сети или изменения ее отдельных параметров. После определения правил система выполняет необходимые функции управления, которые меняют конфигурацию сети. Результаты контролируются путем непрерывного сравнения фактических параметров сети с эталонными.

Общее описание моделей намерений (Intent in Autonomous Networks), предлагаемых TMForum, приводится в документе [2]. Для доступа к моделям предоставляется программный интерфейс (Intent Management API Profile) [4]. Модель намерений строится на основе нескольких онтологий, описание которых приведено в документе TM Forum Intent Ontology (ТЮ) [5]. Модель включает в себя Intent Common Model (Общая модель намерений), представленную в виде серии спецификаций, в которых основное внимание уделяется структуре описания намерений и структуре отчетов о намерениях, а также словарю, используемому в спецификациях общей модели намерений [6]; Intent Extension Models (Модели расширений намерений), описывающую набор моделей, расширяющих модель намерений и направленных на детализацию различных задач, таких как оценка валидности намерений и ожиданий и т. д. [7]; Connector Model (Модель коннекторов), определяющую словарь, который позволяет связывать онтологические модели с моделями, описанными не на RDF, в том числе, с моделями, разработанными TM Forum (например, модели SID) [8].

На рис. 2 показан пример онтологии TMForum, в которой описаны ожидания по качеству предоставления сервиса с указанием параметров, а также их желаемых и граничных значений. На рисунке показано намерение ExampleIntent, имеющее тип Intent, которое связано с двумя ожиданиями: Exp1_delivery (ожидание по доставке целевого сервиса ServiceTarget1, ожидание имеет один параметр Par1) и Exp2_property (ожидание значений параметров предоставляемого сервиса Par2 – Par5). Для параметров Par2 – Par5 ожидаемые значения указаны в формате литералов.

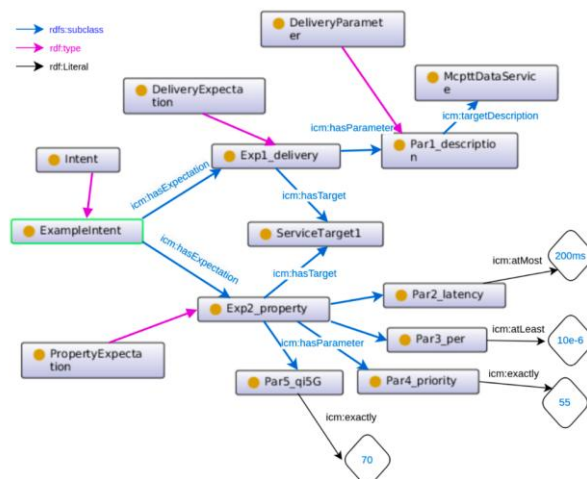


Рис. 2. Пример онтологии, описывающей ожидания по качеству предоставления телекоммуникационного сервиса

4. Развиваемый подход к управлению автономными телекоммуникационными сетями с использованием онтологии намерений. Управление автономными телекоммуникационными сетями с использованием намерений основывается на реализации функций управления намерениями. Функция управления намерениями определяется как функция, которая управляет автономной системой, используя намерения [2]. Такие функции могут выполнять обработку намерений путем формирования нового намерения для его дальнейшей обработки, либо являться конечным обработчиком намерения. Схема функции управления намерениями представлена на рис. 3.

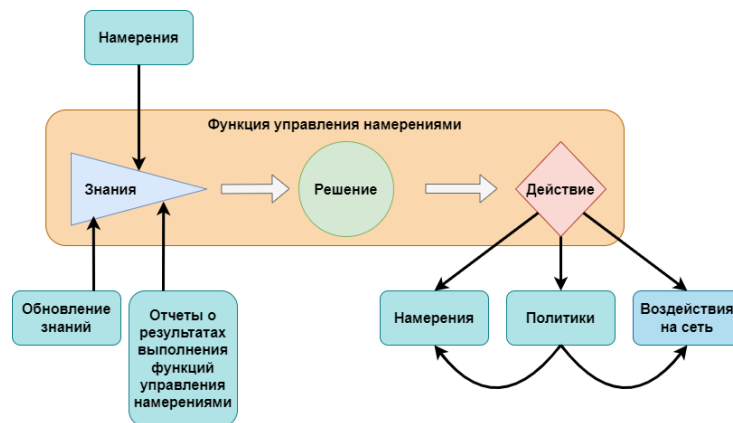


Рис. 3. Схема функции управления намерениями

Функции управления намерениями работают на основе знаний, получаемых от сети о ее состоянии и результаты анализа работы функций управления намерениями, принимают решения о действиях, которые необходимо предпринять, и имеют средства для выполнения выбранных действий. Знания, получаемые из намерений, определяют операционные цели и требования к параметрам оказываемых сервисов. В то время как намерение определяет целевое состояние, результаты измерений и аналитики текущего состояния сети определяют текущее состояние. Решение функции управления намерениями в основном касается устранения разрыва между текущим измеренным и целевым состоянием. В зависимости от механизмов реализации действий можно выделить следующие подходы к управлению автономной сетью:

- ◆ Под управляющим воздействием понимается либо определение дальнейшего намерения, используемого для передачи требований и целей другим подсистемам. Это означает, что функция управления намерениями может действовать, определяя намерение. В этом случае этот экземпляр управления намерениями становится владельцем намерения. Либо под управляющим воздействием понимается вызов обычных функций управления сетью, например, вызов процессов изменения конфигурации системы.

- ◆ Под управляющим воздействием понимается вызов сетевых политик, которые в свою очередь могут как формировать намерения, инициирующие дальнейшее взаимодействие компонентов сети при реализации сетевых сервисов, так и непосредственно вызывать обычные функции управления сетью.

Первый подход целесообразно использовать, когда требуемые корректирующие воздействия заключаются в простом вызове тех или иных функций управления сетью с передачей в них соответствующих параметров или когда формирование нового намерения не требует выполнения сложных сценариев взаимодействия между компонентами сети. Второй подход, подразумевающий совместное применение политик и намерений позволяет реализовывать сложные сценарии для формирования новых намерений и выполнения корректирующих действий над сетевыми компонентами. При этом целевые параметры сети определяются в намерениях, а контекст функционирования сети учитывается в политиках.

5. Реализация систем управления телекоммуникационными сетями с использованием онтологии намерений. На рис. 4 представлены информационные технологии и форматы представления данных, используемые при реализации компонент систем, управляющих телекоммуникационными сетями на основе намерений.

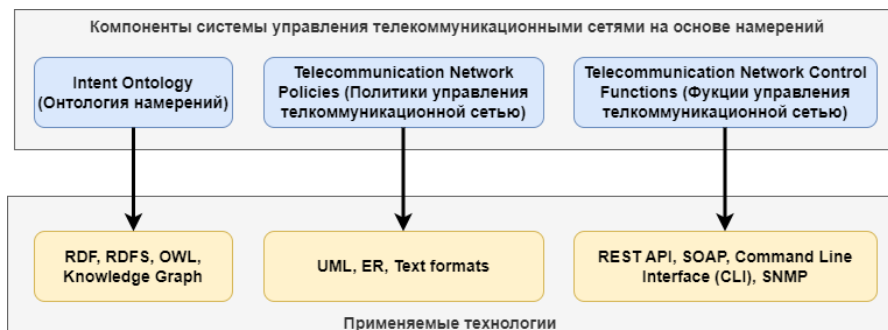


Рис. 4. Информационные технологии и форматы представления данных для реализации компонент систем управления телекоммуникационными сетями на основе намерений

Онтология намерений TMForum описывается в формате RDF. Стандарты RDF [9], RDFS [10] и OWL [11] предусматривают использование глобальных уникальных идентификаторов (IRI) [12] для всех артефактов моделирования, что упрощает работу с несколькими пространствами имен и позволяет распределять субдомены предметной области по нескольким моделям. Для реализации систем управления на основе онтологии намерений могут применяться различные семантические технологии, авторами предлагается использовать графы знаний (Knowledge Graphs) [13]. В [14–16] показано преимущество использования графов знаний при построении моделей телекоммуникационных систем. Модели в форме графов знаний хорошо связываются с онтологией намерений. Намерения соотносятся с элементами сети и рассматриваются как субъекты (определяющие параметры сети) и объекты (определяющие значения), которые связаны между собой. При связывании субъектов и объектов указываются предикаты, например, `icm:atLeast`, `icm:atMost` и пр. Система управления сетью на основе взаимосвязей между субъектами и объектами определяет эталонные значения параметров для каждого элемента сети. При отклонении реальных значений от эталонных, описанных в онтологии намерений, формируются сетевые события, при их обработке определяются политики, которые необходимо применить и выполняются описанные в политиках действия. Политики управления сетью представляются в виде множества правил «Если – То», которые могут быть описаны на языке UML (англ. Unified Modeling Language – унифицированный язык моделирования) [17], в табличной форме или с использованием специально разработанных текстовых форматов (Text formats). При возникновении события система управления сетью проверяет левые части правил, и если результат проверки левой части – TRUE, то осуществляются действия, описанные в правой части правила. Для взаимодействия с сетевыми устройствами могут использоваться различные API (англ. Application Programming Interface – прикладной программный интерфейс), такие как REST (англ. Representational State Transfer – «передача репрезентативного состояния» или «передача „самоописываемого“ состояния») [18] или SOAP (англ. Simple Object Access Protocol – простой протокол доступа к объектам) [19], а также интерфейс командной строки (Command Line Interface – CLI) [20] и SNMP протокол (англ. Simple Network Management Protocol – простой протокол сетевого управления) [21, 22]. Таким образом, система управления сетью формирует управляющие воздействия путем применения той или иной политики управления, выбранной на основе анализа намерений взаимодействующих компонентов.

6. Анализ возможностей и ограничений управления телекоммуникационными сетями на основе политик и онтологии намерений. Сегодня в большинстве случаев операторы связи управляют своими сетями либо с использованием политик, либо наме-

рений. Есть небольшое число телекоммуникационных сетей, которые управляются одновременно и через политики, и через намерения, однако при этом используются статические модели как сети, так и статические параметры намерений, которые определяются на этапе проектирования системы управления. При управлении сетью при помощи намерений без использования политик, намерения должны быть сформулированы на том уровне декомпозиции сетевых компонентов, для которого обеспечены соответствующие функции управления. Такой подход в значительной мере усложняет систему управления и приводит к необходимости смешивать слои управления бизнес-процессами с функциями их реализации через функции управления намерениями. Управление сетью только при помощи политик обычно успешно решает задачи управления сетью с технической точки зрения с учетом контекста ее функционирования, однако не учитывает бизнес-задачи оператора. Совместное применение политик и намерений при управлении телекоммуникационными сетями позволяет системам учитывать бизнес-цели операторов через намерения, а также формулировать сами намерения не глубже того логического уровня, для которого разработаны политики, а также принимать решения непосредственно в процессе их работы. Использование намерений позволяет задавать более сложную логику работы систем относительно систем, управление в которых основано только на политиках. Однако, при использовании статических моделей сетей, политик и намерений, при каждом значимом изменении конфигурации сети и увеличения ее масштаба ручная перестройка политик и намерений может вызвать существенные затруднения. Предлагаемое решение использует модель сети в форме графа знаний, которая, как показано в [14], может автоматически перестраиваться при изменении конфигурации сети, при этом алгоритм перестройки имеет не высокую вычислительную сложность. Адекватность и полнота модели телекоммуникационной сети в форме графа знаний обеспечивается за счет алгоритмов индуктивного и дедуктивного синтеза модели на основе частных графовых моделей, входящих в состав телекоммуникационной сети и обогащении ее оперативными и статистическими данными [14]. Новизна предложенного подхода заключается в объединении модели сети в форме графа знаний и системы управления сетью с использованием политик и намерений, что делает возможным реализовать эффективное управление автономной сетью с использованием политик и намерений для динамических сетей за счет автоматической перестройки сети при изменениях в ее конфигурации и возможности адаптации намерений с помощью соответствующих политик.

7. Пример. Рассмотрим пример использования онтологической модели намерений при реализации процесса регистрации и выполнения заявки на подключение телекоммуникационного сервиса (рис. 5). Модель на рис. 5 представлена в виде RDF графа знаний, что хорошо согласуется с RDF представлением онтологии Intent. Модель построена в соответствии с моделью бизнес-процессов (eTOM) и информационной моделью (SID) TMForum. На рисунке показан момент регистрации заявки, данные заявки содержатся в ABE (Aggregated Business Elements – агрегированный бизнес-объект) «Заявка клиента на подключение услуги». Заявка обрабатывается на сервере приложений Application #1 компонентом Component #1. Функция регистрации заявки реализуется в рамках бизнес-процесса «Обработка заказов». Показатели качества выполнения функции регистрации заявки определены в ожидании Exp2. Показателями являются время принятия заявки в работу и срок подключения сервиса.

В рассматриваемом примере в политике по снижению времени регистрации и исполнения заявок на подключение сервисов содержатся следующие правила формирования управляющих воздействий: (1) если отклонение от допустимого времени регистрации заявки/подключения сервиса в большую сторону составило 5-15%, то об этом необходимо уведомить ответственного исполнителя; (2) если отклонение от допустимого времени регистрации заявки/подключения сервиса в большую сторону составило более 15%, то об этом необходимо уведомить руководителя ответственного исполнителя.

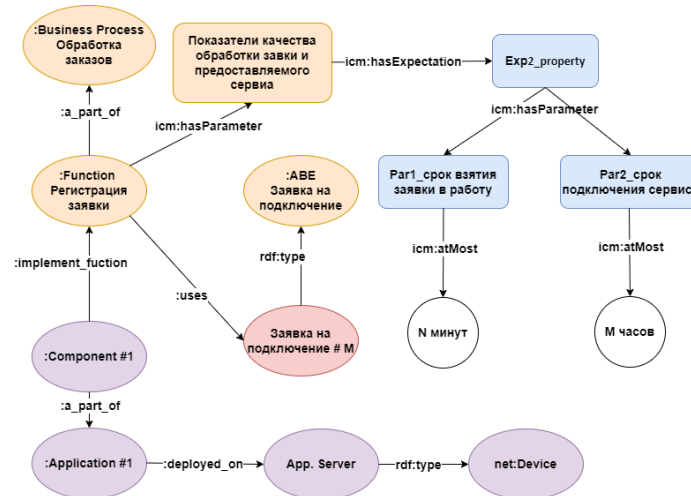


Рис. 5. Онтологическая модель, используемая при реализации функции регистрации и исполнения заявки на подключение телекоммуникационного сервиса на момент создания новой заявки

На рис. 6 показана модель, используемая для реализации функции регистрации и выполнения заявки на подключение сервиса на момент проверки показателей качества предоставляемого сервиса (Telecom service #1), показатели качества определены в ожидании Exp2. Таким показателем в рассматриваемом примере является полоса пропускания предоставляемого канала связи. Модель также представлена в виде RDF графа знаний.

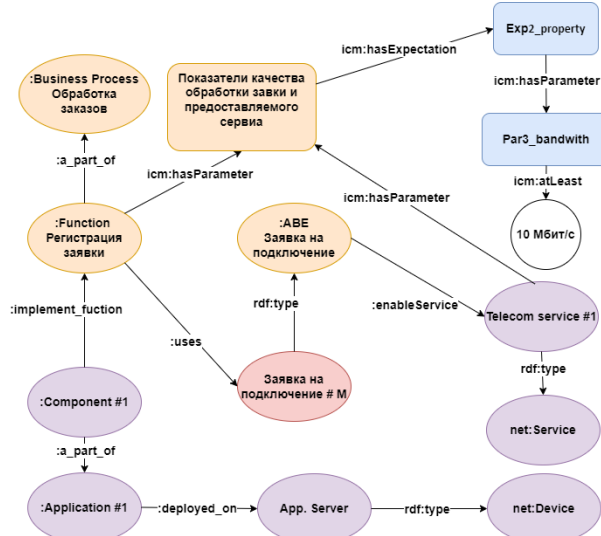


Рис. 6. Онтологическая модель, используемая для реализации функции регистрации и исполнения заявки на подключение телекоммуникационного сервиса на момент проверки показателей качества предоставляемого сервиса

В политике по управлению пропускной способностью предоставляемого канала связи содержатся следующие правила: (1) если значение пропускной способности ниже порогового значения, тогда на соответствующем сетевом устройстве необходимо изменить настройки, влияющие на пропускную способность; (2) если автоматические действия, выполненные в соответствии с правилом (1), не обеспечили требуемую пропускную способность, тогда необходимо автоматически завести заявку в ServiceDesc.

Заключение. В статье рассмотрены возможности управления автономными телекоммуникационными сетями на основе модели сети в форме графа знаний, с использованием политик и намерений. Представлен обзор методов управления телекоммуникационной сетью с использованием политик и намерений, рассмотрена структура онтологии намерений и сценарии ее использования для управления автономными сетями. Предложено совместное использование модели сети в форме графа знаний и системы управления сетью через политики и намерения. Определены основные ограничения, свойственные телекоммуникационным системам, реализующим управление сетями на основе политик и намерений. Рассмотрен практический пример управления сетью при реализации функций регистрации и исполнении заявки на подключение телекоммуникационного сервиса с использованием политик и намерений. В качестве развития предложенного подхода целесообразно произвести его сравнительный анализ с часто используемыми сегодня с использованием математических моделей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Dick K., & Shin B.* Implementation of the Telecom Management Network (TMN) at WorldCom—Strategic Information Systems Methodology Focus // *Journal of Systems Integration*. – 2001. – Vol. 10, Issue 4. – P. 329-354. – <https://doi.org/10.1023/a:1011249800980>.
2. IG1253 Intent in Autonomous Networks v1.3.0. – Режим доступа: <https://www.tmforum.org/resources/how-to-guide/ig1253-intent-in-autonomous-networks-v1-3-0/> (дата обращения: 11.06.2023).
3. Policy-Based Network Management. – Elsevier, 2004. – <https://doi.org/10.1016/b978-1-55860-859-7.x5033-6>.
4. TMF921A Intent Management API Profile v1.1.0. – Режим доступа: <https://www.tmforum.org/resources/specification/tmf921a-intent-management-api-profile-v1-1-0/> (дата обращения: 11.06.2023).
5. TR292 TM Forum Intent Ontology (TIO) v3.0.0. – Режим доступа: <https://www.tmforum.org/resources/technical-report/tr292-tm-forum-intent-ontology-tio-v3-1-0/> (дата обращения: 11.06.2023).
6. TR290 Intent Common Model v3.0.0. – Режим доступа: <https://www.tmforum.org/resources/technical-report/tr290-intent-common-model-v3-1-0/> (дата обращения: 11.06.2023).
7. TR291 Intent Extension Models v1.1.0. – Режим доступа: <https://www.tmforum.org/resources/technical-report/tr291-intent-extension-models-v1-1-0/> (дата обращения: 11.06.2023).
8. TR293 Connector Model v1.0.0. – Режим доступа: <https://www.tmforum.org/resources/technical-report/tr293-connector-model-v2-0-0/> (дата обращения: 11.06.2023).
9. Resource Description Framework (RDF). – Режим доступа: <https://www.w3.org/RDF/> (дата обращения: 11.12.2024).
10. RDF Schema 1.1. – Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/> (дата обращения: 11.12.2024).
11. Web Ontology Language (OWL). – Режим доступа: <https://www.w3.org/OWL/> (дата обращения: 11.12.2024).
12. Internationalized Resource Identifiers (IRIs). – Режим доступа: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3987.txt> (дата обращения: 11.12.2024).
13. *Hogan A., Blomqvist E., Cochez M., D'amato C., Melo G.D., Gutierrez C., Kirrane S., Gayo J.E.L., Navigli R., Neumaier S., Ngomo A.-C. N., Polleres A., Rashid S.M., Rula A., Schmelzeisen L., Sequeda J., Staab S., & Zimmermann A.* Knowledge Graphs // In *ACM Computing Surveys*. – 2021. – Vol. 54, Issue 4. – P. 1-37. Association for Computing Machinery (ACM). – <https://doi.org/10.1145/3447772>.
14. *Man T., Vodyaho A., Ignatov D. I., Kulikov I., & Zhukova N.* Synthesis of multilevel knowledge graphs: Methods and technologies for dynamic networks // In *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2023. – Vol. 123. – P. 106244. – Elsevier BV. – <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106244>.
15. *Kulikov I., Vodyaho A., Stankova E., Zhukova N.* Ontology for Knowledge Graphs of Telecommunication Network Monitoring Systems / In: Gervasi O. et al. (eds.) // *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2021*. ICCSA 2021. Lecture Notes in Computer Science. – 2021. – Vol. 12956. – Springer, Cham. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-87010-2_32.
16. *Krinkin K., Vodyaho A. I., Kulikov I., & Zhukova N.* Deductive Synthesis of Networks Hierarchical Knowledge Graphs // *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS)*. – 2021. – 12 (3). – P. 32-48. – <http://doi.org/10.4018/IJERTCS.2021070103>.
17. Unified Modeling Language (UML). – Режим доступа: <https://www.omg.org/spec/UML/> (дата обращения: 11.12.2024).
18. *Fielding Roy Thomas.* Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Doctoral dissertation, University of California, Irvine, 2000.

19. SOAP Version 1.2. – Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/soap12/> (дата обращения: 11.12.2024).
20. Kipper G. The Value of Augmented Reality // In *Augmented Reality*. – Elsevier, 2013. – P. 51-95. – <https://doi.org/10.1016/b978-1-59-749733-6.00003-6>.
21. Introduction to version 2 of the Internet-standard Network Management Framework. – Режим доступа: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1441> (дата обращения: 11.12.2024).
22. Coexistence between version 1 and version 2 of the Internet-standard Network Management Framework. – Режим доступа: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1452> (дата обращения: 11.12.2024).
23. Осипов В.Ю., Носаль И.А. Обоснование мероприятий информационной безопасности // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 2 (63). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-meropriyatiy-informatsionnoy-bezopasnosti> (дата обращения: 24.12.2024).

REFERENCES

1. Dick K., & Shin B. Implementation of the Telecom Management Network (TMN) at WorldCom—Strategic Information Systems Methodology Focus, *Journal of Systems Integration*, 2001, Vol. 10, Issue 4, pp. 329-354. Available at: <https://doi.org/10.1023/a:1011249800980>.
2. IG1253 Intent in Autonomous Networks v1.3.0. Available at: <https://www.tmforum.org/resources/how-to-guide/ig1253-intent-in-autonomous-networks-v1-3-0/> (accessed 11 June 2023).
3. Policy-Based Network Management. – Elsevier, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1016/b978-1-55860-859-7.x5033-6>.
4. TMF921A Intent Management API Profile v1.1.0. Available at: <https://www.tmforum.org/resources/specification/tmf921a-intent-management-api-profile-v1-1-0/> (accessed 11 June 2023).
5. TR292 TM Forum Intent Ontology (TIO) v3.0.0. Available at: <https://www.tmforum.org/resources/technical-report/tr292-tm-forum-intent-ontology-tio-v3-1-0/> (accessed 11 June 2023).
6. TR290 Intent Common Model v3.0.0. Available at: <https://www.tmforum.org/resources/technical-report/tr290-intent-common-model-v3-1-0/> (accessed 11 June 2023).
7. TR291 Intent Extension Models v1.1.0. Available at: <https://www.tmforum.org/resources/technical-report/tr291-intent-extension-models-v1-1-0/> (accessed 11 June 2023).
8. TR293 Connector Model v1.0.0. Available at: <https://www.tmforum.org/resources/technical-report/tr293-connector-model-v2-0-0/> (accessed 11 June 2023).
9. Resource Description Framework (RDF). Available at: <https://www.w3.org/RDF/> (accessed 11 December 2024).
10. RDF Schema 1.1. Available at: <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/> (accessed 11 December 2024).
11. Web Ontology Language (OWL). Available at: <https://www.w3.org/OWL/> (accessed 11 December 2024).
12. Internationalized Resource Identifiers (IRIs). Available at: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3987.txt> (accessed 11 December 2024).
13. Hogan A., Blomqvist E., Cochez M., D'amato C., Melo G.D., Gutierrez C., Kirrane S., Gayo J.E.L., Navigli R., Neumaier S., Ngomo A.-C. N., Polleres A., Rashid S.M., Rula A., Schmelzeisen L., Sequeda J., Staab S., & Zimmermann A. Knowledge Graphs, In *ACM Computing Surveys*, 2021, Vol. 54, Issue 4, pp. 1-37. Association for Computing Machinery (ACM). Available at: <https://doi.org/10.1145/3447772>.
14. Man T., Vodyaho A., Ignatov D. I., Kulikov I., & Zhukova N. Synthesis of multilevel knowledge graphs: Methods and technologies for dynamic networks, In *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, Vol. 123, pp. 106244. Elsevier BV. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106244>.
15. Kulikov I., Vodyaho A., Stankova E., Zhukova N. Ontology for Knowledge Graphs of Telecommunication Network Monitoring Systems, In: Gervasi O. et al. (eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2021. ICCSA 2021. Lecture Notes in Computer Science*, 2021, Vol. 12956. Springer, Cham. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-87010-2_32.
16. Krinkin K., Vodyaho A. I., Kulikov I., & Zhukova N. Deductive Synthesis of Networks Hierarchical Knowledge Graphs, *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS)*, 2021, 12 (3), pp. 32-48. Available at: <http://doi.org/10.4018/IJERTCS.2021070103>.
17. Unified Modeling Language (UML). Available at: <https://www.omg.org/spec/UML/> (accessed 11 December 2024).
18. Fielding Roy Thomas. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Doctoral dissertation, University of California, Irvine, 2000.
19. SOAP Version 1.2. Available at: <https://www.w3.org/TR/soap12/> (accessed 11 December 2024).
20. Kipper G. The Value of Augmented Reality, In *Augmented Reality*. Elsevier, 2013, pp. 51-95. Available at: <https://doi.org/10.1016/b978-1-59-749733-6.00003-6>.

21. Introduction to version 2 of the Internet-standard Network Management Framework. Available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1441> (accessed 11 December 2024).
22. Coexistence between version 1 and version 2 of the Internet-standard Network Management Framework. Available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1452> (accessed 11 December 2024).
23. Osipov V.Yu., Nosal' I.A. Obosnovanie meropriyatiy informatsionnoy bezopasnosti [Justification of information security measures], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information management systems], 2013, No. 2 (63). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-meropriyatiy-informatsionnoy-bezopasnosti> (accessed 24 December 2024).

Жукова Наталья Александровна – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: nazhukova@mail.ru; г. Санкт-Петербург Россия; тел.: 88123283411; д.т.н.; доцент; в.н.с.

Куликов Игорь Александрович – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»; e-mail: i.a.kulikov@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88122342682; ассистент кафедры МОЭВМ.

Zhukova Nataly Alexandrovna – St. Petersburg Institute of Informatics and Automation Russian Academy of Sciences; e-mail: nazhukova@mail.ru; Saint-Petersburg Russia; phone: +7812 3283411; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Kulikov Igor Aleksandrovich – Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”; e-mail: i.a.kulikov@gmail.com; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78122342682; department assistant.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-226-236

О.В. Шиндор, П.А. Кокунин, А.А. Егорчев, Л.Н. Сафина, Я.С. Мурин

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА КЛАССА МИКРО

В современной подводной робототехнике актуальными являются задачи управления, повышения автономности, увеличения выполняемых функций и возможность импортозамещения. В работе рассматривается пример построения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) класса микро, основной целью которого является использование в образовательных целях, в частности для вовлечения школьников в инженерное направление и программирование, студентов в программирование микроконтроллеров, практическое изучение систем управления, цифровую обработку изображений с использованием вейвлет-преобразования. В статье представлены основные принципы и особенности конструкторской, аппаратной, алгоритмической и программной реализации роботизированного конструктора на основе ТНПА класса микро. Приведены обоснования применения конструкторского решения для использования ТНПА в образовательных целях, рассмотрены принципы алгоритмического передвижения подводного блока. На основе двумерного вейвлет-преобразования для обработки подводных изображений разработан алгоритм и проведена его верификация. Вейвлет-преобразование является современным и эффективным инструментом для выявления локальных особенностей сигналов и обработки изображения. Использование двумерной вейвлет-декомпозиции, представляющей собой процесс разложения сигнала на высокочастотные и низкочастотные составляющие, позволяет сформировать четыре матрицы вейвлет-коэффициентов, содержащих аппроксимирующие с низкочастотными составляющими и детализирующие коэффициенты (высокочастотные) трех типов: несущих информацию о вертикальных, горизонтальных и диагональных параметрах анализируемого изображения. В процессе обработки изображения после применения вейвлет-преобразования выполняется для увеличения контрастности изображения изменение коэффициентов аппроксимации, далее осуществляется определение RGB компонентов на основе матрицы аппроксимации вейвлет-коэффициентов на основе градаций серого и вычисление средних и максимальных значений для каждой из компонент. Далее выполняется расчет коэффициента цветопередачи, коэффициентов улучшения, на основе которых формируется модифицированная матрица вейвлет-коэффициентов и применяется обратное преобразование. В результате применения алгоритма на

тестовых изображениях показана возможность цветокоррекции, в частности уменьшение влияния зеленой и голубой составляющих на 8,6%. Полученные результаты могут быть использованы при построении систем распознавания изображений в подводной среде и проектировании автономных необитаемых подводных аппаратов.

Алгоритм управления; обработка изображения; вейвлет-преобразование; телеуправляемый необитаемый подводный аппарат.

O.V. Shindor, P.A. Kokunin, A.A. Egorchev, L.N. Safina, Ya.S. Murin

HARDWARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A REMOTELY OPERATED UNMANNED UNDERWATER VEHICLE OF THE MICRO-CLASS

In modern underwater robotics, the tasks of control, increasing autonomy, increasing the functions performed and the possibility of import substitution are relevant. The paper considers an example of building a remotely controlled unmanned underwater vehicle (RCUV) of the micro class, the main purpose of which is to use for educational purposes, in particular for involving schoolchildren in engineering and programming, students in programming microcontrollers, practical study of control systems, digital image processing using wavelet transform. The article presents the basic principles and features of the design, hardware, algorithmic and software implementation of a robotic designer based on a RCUV of the micro class. The justification for the application of the design solution for using the RCUV for educational purposes is given, the principles of algorithmic movement of the underwater unit are considered. Based on the two-dimensional wavelet transform for processing underwater images, an algorithm was developed and verified. The wavelet transform is a modern and effective tool for identifying local features of signals and image processing. The use of two-dimensional wavelet decomposition, which is the process of decomposing a signal into high-frequency and low-frequency components, allows us to form four matrices of wavelet coefficients containing approximating ones with low-frequency components and detailing coefficients (high-frequency) of three types: carrying information about the vertical, horizontal and diagonal parameters of the analyzed image. In the process of image processing after applying the wavelet transform, the approximation coefficients are changed to increase the image contrast, then the RGB components are determined based on the approximation matrix of the wavelet coefficients based on grayscale and the average and maximum values are calculated for each of the components. Then the color rendering coefficient and improvement coefficients are calculated, on the basis of which a modified matrix of wavelet coefficients is formed and the inverse transform is applied. As a result of applying the algorithm to test images, the possibility of color correction was demonstrated, in particular, the reduction of the influence of green and blue components by 8.6%. The results obtained can be used in the construction of image recognition systems in the underwater environment and the design of autonomous unmanned underwater vehicles.

Control algorithm; image processing; wavelet transform; remotely operated unmanned underwater vehicle.

Введение. Актуальной темой развития морской робототехники является проектирование, управление, повышение автономности и увеличение степени автоматизации при выполнении операций телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) [1–6]. Важной задачей остается импортозамещение ТНПА для выполнения всех видов подводных работ. Это объясняется широким применением ТНПА в нефтегазовой сфере, при проведении подводных, в том числе и глубинных работ, обследовании дна и выполнении поисковых операций, биологических и экологических исследованиях.

Особенностью эксплуатации ТНПА является использование в водной среде, что накладывает ряд требований на движители, электронную часть и реализацию алгоритмов управления.

Вопросы управления ТНПА рассмотрены в ряде работ. В [5] приведена упрощенная математическая модель ТНПА, на основании которой в последующем реализованы алгоритмы управления аппаратом, при этом исключена одна из шести степеней свободы, за счет специального расположения двигателей. В [2] модель движения строится с учетом кабеля «нулевой» плавучести длиной порядка 2 км.

Работы [3, 4] посвящены специальным вопросам управления ТНПА, при этом рассматриваются ТНПА легкого или тяжелого класса. Модель малогабаритного ТНПА приведена в [6], горизонтальные движители которого расположены под углом относительно модуля плавучести. В [7] приведен концепт ТНПА микро. Управление аппаратом в усло-

виях сложной динамической системы с решением задачи стабилизации положения кабеля (с «нулевой» плавучестью) на заданной глубине движения показана в [8]. Анализ публикаций показывает заинтересованность исследователей данной тематикой в случае различных конструкций и задач использования ТНПА.

Современные подводные аппараты включают в себя программное обеспечение. В этом направлении ведутся разработки по реализации программного обеспечения управления движителями и индикации [9–11], математического и имитационного моделирования [12]. Особенности данных разработок является их уникальность, зависящая от размера ТНПА, выполняемых ими задач и условий применения. Основной средой использования необитаемых подводных аппаратов осуществляется в морской среде, при этом их использование в речных водоемах также является актуальным. Целью данной работы является разработка конструкционной, аппаратной и программной составляющих ТНПА микро, реализующего функцию подводного наблюдения в пресных водоемах. На видеосъемку под водой оказывают влияние преломление света, в результате чего объекты кажутся ближе их реального расстояния, в пресной воде присутствует взвесь песка и ила, что значительно снижает контрастность изображений, а также смещение его цветовой гаммы. Для обработки изображения предлагается использовать методы вейвлет-преобразования. Возможность их применения к обработке подводных изображений показаны в [13–17].

Конструкторская и аппаратная реализация ТНПА микро. Разрабатываемый робототехнический комплекс относится к типу ТНПА микро, весом до 5 кг, который может применяться для наблюдения за подводными объектами в пресноводных водоемах на небольших глубинах, исследования дна, а также как учебный комплекс для школьников и студентов.

Движущийся подводный аппарат вместе с окружающей его жидкостью представляет собой сложную гидродинамическую систему. В общем виде подводный аппарат обладает шестью степенями свободы и его движение описывается уравнением в матричном виде [18, 19]:

$$M\dot{v} + (C(v) + D(v))v + g(x) = \tau,$$

где M – матрица инерции, $C(v)$ – матрица кориолисовых и центробежных сил, $D(v)$ – матрица гидродинамических сил и моментов, $g(x)$ – вектор гидростатических сил и моментов, τ – вектор проекций упоров и моментов движителей, v – вектор проекций линейной и угловой скоростей движения НПА, при этом используют три системы координат: неподвижная, связанная и скоростная.

В состав разрабатываемого робототехнического комплекса входит подводный блок, блок управления, пульт управления, соединительный кабель, устройство отображения информации.

Для простоты сборки подводный блок выполнен из пластмассовых деталей типа балка, уголок, пластина, которые соединяются между собой винтовыми соединениями. Блок в силу расположения движителей обладает тремя степенями свободы. Внешний вид модели подводного блока в системе координат и макетный образец приведены на рис. 1.

Согласно структурной схеме, изображенной на рис. 2, в состав движительно-рулевого комплекса входят один движитель вертикального хода, отвечающий за всплытие и погружение и два движителя горизонтального хода, отвечающих за продольное перемещение, повороты. Информация с пульта управления поступает на блок обработки информации и затем передается на драйверы движителей, регулирующих скорость и направление вращения. В качестве движителей используются коллекторные двигатели постоянного тока. При использовании в водной среде необходима предварительная их герметизация.

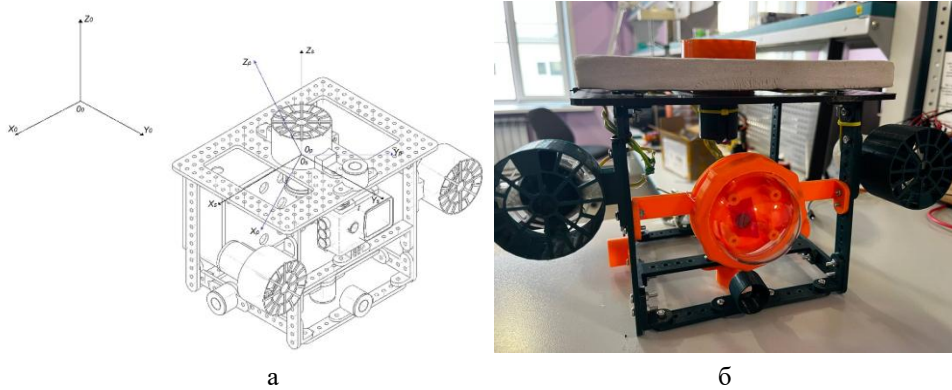


Рис. 1. Подводный блок ТНПА микро: а) 3D-модель, б) макетный образец

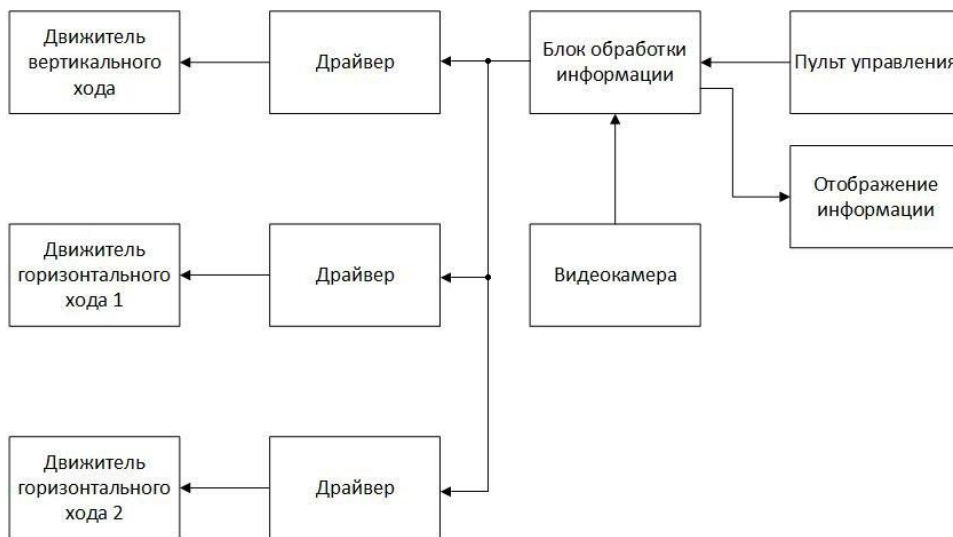


Рис. 2. Структурная схема ТНПА микро

Информация с видеокамеры обрабатывается и передается на устройство отображения информации. Блок обработки информации реализован на базе микроконтроллера STM32, программная реализация алгоритма выполнена на языке Си.

Для задания траектории движения подводного блока используется пульт управления. Его аппаратная реализация выполнена на основе потенциометрических датчиков, сигнал с которых подается на микроконтроллер блока обработки информации через аналого-цифровой преобразователь. Алгоритм управления движением реализован таким образом, что всплытие и погружение являются приоритетными операциями, и осуществляется при одновременном нажатии двух стиков. Для исключения ложных срабатываний был определен диапазон, соответствующий дребезгу контактов, управление скоростью вращения двигателей осуществляется с помощью ШИМ-сигнала.

Разработка алгоритма обработки подводных изображений. Изображение, получаемое с подводного блока, характеризуется наличием искажений и преобладанием зеленовато-голубого оттенка. Это связано с поглощением и преломлением света. Взвесь песка и ила значительно снижают контрастность изображения и смещение его цветовой гаммы. Предлагается использовать вейвлет-преобразование для обработки подводных изображений, так как является эффективным методом анализа сигналов, сжатия данных, устранения шума и повышения контрастности изображения. Реализуется преобразование

посредством разложения изображения на компоненты, характеризующиеся высокочастотными и низкочастотными составляющими. Применение вейвлет-преобразования для улучшения изображений в условиях низкой освещенности показано в [20, 21], для устранения дымки и цветокоррекции в [22]. Также для цветокоррекции может применяться слияние изображений методами вейвлет-анализа, реализация данного алгоритма показана в работе [23]. В данной работе предлагается алгоритм, основанный на дискретном вейвлет-разложении с последующей коррекцией аппроксимирующих коэффициентов по цветовым составляющим: красный, зеленый, синий (RGB).

При анализе изображений используется двумерная вейвлет-декомпозиция, которая представляет собой процесс разложения сигнала или изображения на составляющие. К каждой строке матрицы s применяется одномерное дискретное вейвлет-преобразование. В результате формируются две матрицы, содержащие высокочастотные (ВЧ) и низкочастотные (НЧ) составляющие. Применение к столбцам каждой матрицы одномерного преобразования позволяет сформировать четыре матрицы коэффициентов, содержащие НЧ/НЧ, НЧ/ВЧ, ВЧ/НЧ, ВЧ/ВЧ составляющие. Первая матрица представляет собой аппроксимирующие коэффициенты A_k , три другие D_k – детализирующие, вычисления осуществляются по формулам:

$$A_k[n] = \sum x[n] \cdot \phi_k[n - 2^k]$$

$$D_k[n] = \sum x[n] \cdot \psi_k[n - 2^k],$$

где k – уровень разложения, $\phi(x)$ – масштабирующая функция и $\psi(x)$ – материнский вейвлет. При этом определяются детализирующие коэффициенты трех типов: H_k – горизонтальные, V_k – вертикальные, D_k – диагональные, т.е. в них отражаются изменения по горизонтальной, вертикальной и диагональной координатам. Тогда схема разложения изображения может быть представлена в следующем виде:

$$C_0 = (A_1, H_1, V_1, D_1) \rightarrow (A_2, H_2, V_2, D_2, H_1, V_1, D_1) \rightarrow \dots$$

В аппроксимирующих коэффициентах содержится информация о форме и структуре изображения, в детализирующих о его мелких деталях.

Для увеличения контрастности и улучшения цветопередачи изображений был разработан алгоритм, реализация которого выполнена с использованием программного пакета MATLAB.

Основные этапы алгоритма:

1. Импорт изображения.
2. Двумерное дискретное вейвлет-преобразование с заданным уровнем разложения n .
3. Изменение коэффициентов аппроксимации уровня n для увеличения контрастности изображения в соответствии с выражением:

$$A' = \frac{A - \min(A)}{\max(A) - \min(A)},$$

где A – оригинальное значение вейвлет-коэффициента; A' – модифицированное значение вейвлет-коэффициента; $\min(A)$ и $\max(A)$ – минимальные и максимальные значения вейвлет-коэффициентов в матрице.

4. Определение RGB компонентов на основе матрицы аппроксимации вейвлет-коэффициентов на основе градаций серого:

$$X_R = \frac{\sum A'}{N}, X_G = \frac{\sum A'}{N}, X_B = \frac{\sum A'}{N}.$$

5. Вычисление средних и максимальных значений каждого из RGB компонент на основе матрицы модифицированных аппроксимирующих коэффициентов $X_{Rcp}, X_{Gcp}, X_{Bcp}, X_{Rmax}, X_{Gmax}, X_{Bmax}$:

$$X_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad X_{max} = \max(X_i).$$

где N – общее количество вейвлет-коэффициентов.

6. Нахождение доминирующего X_d RGB компонента в изображении.

7. Расчет коэффициента цветопередачи (CCF), используемый для усиления цветовых компонент.

$$X_f = \frac{X_{max}}{X_{dmax}}, \quad CCF = \frac{X_{f1} + X_{f2}}{2},$$

где X_f рассчитывается для не доминирующих компонент в зависимости от результата п.6.

8. Определение коэффициентов улучшения:

$$\begin{aligned} X_{mG} &= CCF \cdot X_{Gcp} \cdot X_{Gmax} \\ X_{mR} &= CCF \cdot X_{Rcp} \cdot X_{Rmax} \\ X_{mB} &= CCF \cdot X_{Bcp} \cdot X_{Bmax} \end{aligned}$$

9. Получение матрицы модифицированных вейвлет-коэффициентов:

$$\begin{aligned} X'_{R} &= X_{mR} \cdot X_R \\ X'_{G} &= X_{mG} \cdot X_G \\ X'_{B} &= X_{mB} \cdot X_B \end{aligned}$$

10. Конвертация изображения в модель цветового пространства HSI .

11. Обратное ДВП на основе модифицированной матрицы вейвлет-коэффициентов.

Предложенный алгоритм позволяет выполнять цветокоррекцию подводных изображений с целью уменьшения влияния зеленого цвета.

Апробация алгоритма обработки подводных изображений. Для проверки работы алгоритма, предложенного в предыдущем разделе, рассмотрим изображение, полученное в подводных условиях, размером 1520x2704 пикселей. В качестве материнского вейвлета используется вейвлет Добеши 2 (db2) с уровнем разложения 3.

Рис. 3 иллюстрирует результаты обработки изображения.



Рис. 3. Обработка изображения с помощью вейвлет-преобразования:
а – исходное изображение, б – изображение после обработки (уровень разложения 3)

В исходном изображении (рис. 3,а) заметно преобладание зелёных оттенков. Обработанное изображение демонстрирует сбалансированную цветовую гамму с улучшенной передачей естественных тонов, значительное сокращение зеленого цвета, что способствует лучшей визуализации объектов и деталей сцены. Значение коэффициента, определяющего G компоненту изображения (X'_G), уменьшилось с 0,82 в исходном изображении до 0,75 после обработки, при этом значения коэффициентов R и B составляющих увеличились после применения алгоритма, для B с 0,46 (X'_B) до 0,59 (X'_R).

При увеличении уровня разложения изменяется баланс белого и черного. На рис. 4 представлено обработанное изображение с уровнем разложения 23, из которого видно, что воздействие алгоритма усиливает яркость. Величина коэффициента G компоненты X'_G составляет 0,78 и дальнейшее увеличение коэффициентов R и B составляющих по сравнению с уровнем разложения – 3.



Рис. 4. Изображение после обработки (уровень разложения 23)

Результаты обработки экспериментальных изображений показывают, что предложенный алгоритм позволяет изменять уровень влияния цветовых каналов, в частности позволяя корректировать зеленую и голубую составляющую изображения за счет уменьшения коэффициентов G составляющей и увеличения B .

Выводы. В работе представлены конструкторская, аппаратная, алгоритмическая и программная реализации ТНПА микро. В конструкторской и аппаратной реализации рассмотрены особенности технического решения с точки зрения отличия от имеющихся аналогов, приведены принципы разработки алгоритма управления подводным блоком. В программной реализации ТНПА микро показана возможность обработки подводных изображений методами вейвлет-преобразования. Предложен алгоритм корректировки зеленой и голубой составляющих подводного изображения за счет уменьшения коэффициентов G составляющей и увеличения B .

Рассмотренный ТНПА микро разрабатывается для применения в образовательных целях, при этом полученные результаты могут использоваться при построении исследовательских ТНПА класса микро и частично реализованы при построении автономных необитаемых подводных аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коноплин А.Ю., Денисов В.А., Даутова Т.Н. [и др.]. Технология использования ТНПА для выполнения глубоководных исследовательских операций // Экстремальная робототехника. – 2020. – № 1 (31). – С. 246-251.
2. Данилова С.К., Кусков А.М., Кусков И.М., Тарасов Н.Н. Модель движения и адаптивного управления телеуправляемого необитаемого подводного аппарата в сложной динамической системе // Морской вестник. – 2019. – № 2 (70). – С. 93-97.
3. Костенко В.В., Павин А.М. К вопросу обеспечения независимости управляющих воздействий движительно-рулевого комплекса подводного аппарата // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2015. – Т. 6. – С. 118-123.

4. Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Павин А.М. Навигационное и алгоритмическое обеспечение ТНПА для эффективного решения задач идентификации донных целей и инспекции морских объектов // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2013. – Т. 5. – С. 30-40. – EDN YSWBWD.
5. Борисенко Н.А., Белоусов М.О. Разработка упрощенной математической модели телеуправляемого необитаемого подводного аппарата // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника - 2019: Матер. V Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Севастополь, 28–30 мая 2019 года / науч. ред. Крамарь В.А.. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2019. – С. 5-9.
6. Патент на полезную модель № 206387 U1 Российская Федерация, МПК B63C 11/48, B63G 8/00. Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат: № 2021115452: заявл. 31.05.2021: опубл. 08.09.2021 / Р.Р. Кульмухаметов, С.А. Гафуров, Р.М. Акбиров; заявитель Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис».
7. Фролов Д.В., Ковалев А.Ю., Буланчиков Д.С., Кузнецов Д.И. Концепт телеуправляемого необитаемого подводного аппарата класса микро для решения исследовательских задач // Научные горизонты. – 2018. – № 10 (14). – С. 253-258. – EDN YMQTTN.
8. Данилова С.К., Кусков А.М., Кусков И.М., Тарасов Н.Н. Модель движения и адаптивного управления телеуправляемого необитаемого подводного аппарата в сложной динамической системе // Морской вестник. – 2019. – № 2 (70). – С. 93-97. – EDN KLTJLU.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612304 Российская Федерация. Программное обеспечение блока управления и индикации телеуправляемого необитаемого подводного аппарата: № 2017615431: заявл. 07.06.2017: опубл. 15.02.2018 / А.С. Амирагов, Д.А. Никулин, А.М. Михайлов, А.А. Комиссаров; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – EDN GXLPLA.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666504 Российская Федерация. Управление движителями ТНПА: № 2019665395: заявл. 29.11.2019: опубл. 11.12.2019 / Ю.А. Чурсин, В.В. Павличев, Р.А. Нурмухаметов; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – EDN HSMYAO.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023661444 Российская Федерация. Программа для энергетически оптимального распределения управляющих команд на движительно-рулевой комплекс телеуправляемого необитаемого подводного аппарата: № 2023660819: заявл. 29.05.2023: опубл. 31.05.2023; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "КАШАЛОТ". – EDN RJADAH.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612303 Российская Федерация. Программа реализации математической и имитационной моделей электронного макета телеуправляемого необитаемого подводного аппарата: № 2017615459: заявл. 07.06.2017: опубл. 15.02.2018 / В.С. Палто; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – EDN TSRKTO.
13. Amir M., Rehman Z., Pu Y.-F., Ahmed A. and Abro W.A. Image Enhancement in Varying Light Conditions Based on Wavelet Transform // 2019 16th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, Chengdu, China, 2019. – P. 317-322.
14. Sun T. and Jung C. Readability enhancement of low light images based on dual-tree complex wavelet transform // 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China, 2016.
15. Espinosa A.R., McIntosh D., Albu A.B. An efficient approach for underwater image improvement: Deblurring, dehazing, and color correction // Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. – 2023. – P. 206-215.
16. Yadav S. and Raj K. Underwater Image Enhancement via Color Balance and Stationary Wavelet Based Fusion // 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangluru, India, 2020. – P. 1-5.
17. Сафина Л.Н., Шиндор О.В. Цветокоррекция подводных снимков на основе вейвлет-преобразования // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМПИ–2024): Матер. XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, 30 октября - 1 ноября 2024 года. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2024. – С. 176-178.
18. Fossen T.I. Guidance and control of oceanic vehicles. – John Willei and Sons, 1994. – 494 p.
19. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Системы и устройства управления подводных роботов. – М.: Наука, 2005. – 270 с.

20. Aamir M., Rehman Z., Pu Y.-F., Ahmed A. and Abro W.A. Image Enhancement in Varying Light Conditions Based on Wavelet Transform // 2019 16th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, Chengdu, China, 2019. – P. 317-322.
21. Sun T. and Jung C. Readability enhancement of low light images based on dual-tree complex wavelet transform // 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China, 2016.
22. Espinosa A.R., McIntosh D., Albu A.B. An efficient approach for underwater image improvement: Deblurring, dehazing, and color correction // Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. – 2023. – P. 206-215.
23. Yadav S. and Raj K. Underwater Image Enhancement via Color Balance and Stationary Wavelet Based Fusion // 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangluru, India, 2020. – P. 1-5.
24. Лианге П., Круглова Л.В., Ранасингхе Н. Улучшение обработки изображений с помощью модели сверточной нейронной сети на основе вейвлетов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 6 (144).

REFERENCES

1. Konoplin A.Yu., Denisov V.A., Dautova T.N. [i dr.]. Tekhnologiya ispol'zovaniya TNPA dlya vypolneniya glubokovodnykh issledovatel'skikh operatsiy [Technology for using ROVs for Deep sea research operations], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme Robotics], 2020, No. 1 (31), pp. 246-251.
2. Danilova S.K., Kuskov A.M., Kuskov I.M., Tarasov N.N. Model' dvizheniya i adaptivnogo upravleniya teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo apparata v slozhnoy dinamicheskoy sisteme [Model of movement and adaptive control of a remotely operated underwater vehicle in a complex dynamic system], *Morskoy vestnik* [Marine Bulletin], 2019, No. 2 (70), pp. 93-97.
3. Kostenko V.V., Pavin A.M. K voprosu obespecheniya nezavisimosti upravlyayushchikh vozdeystviy dvizhitel'no-rulevogo kompleksa podvodnogo apparata [On the issue of ensuring independence of control actions of the thruster-rudder complex of the underwater vehicle], *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana* [Technical Problems of World Ocean Development], 2015, Vol. 6, pp. 118-123.
4. Vaulin Yu.V., Kostenko V.V., Pavin A.M. Navigatsionnoe i algoritmicheskoe obespechenie TNPA dlya effektivnogo resheniya zadach identifikatsii donnykh tseley i inspektsii morskikh ob"ektov [Navigation and algorithmic support of ROVs for efficient bottom target identification and marine object inspection], *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana* [Technical Problems of World Ocean Development], 2013, Vol. 5, pp. 30-40. EDN YSWBWD.
5. Borisenko N.A., Belousov M.O. Razrabotka uproshchennoy matematicheskoy modeli teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo apparata [Development of a simplified mathematical model of a remotely operated underwater vehicle] *Intellektual'nye sistemy, upravlenie i mekhatronika - 2019: Mater. V Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, Sevastopol', 28–30 maya 2019 goda* [Intelligent Systems, Control and Mechatronics - 2019: Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students, Sevastopol, May 28–30, 2019], ed. by Kramar' V.A. Sevastopol': Sevastopol'skiy gosudarstvennyy universitet, 2019, pp. 5-9.
6. Kul'mukhametov R.R., Gafurov S.A., Akbirov R.M. Patent na poleznuyu model' № 206387 U1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B63C 11/48, B63G 8/00. Teleupravlyаемyy neobitaемый podvodnyy apparat: № 2021115452 [Patent for Utility Model No. 206387 U1 Russian Federation, IPC B63C 11/48, B63G 8/00. Remotely operated underwater vehicle: No. 2021115452 appl. 31.05.2021: publ. 08.09.2021; applicant Autonomous Non-Profit Organization of Higher Education "Innopolis University".
7. Frolov D.V., Kovalev A.Yu., Bulanchikov D.S., Kuznetsov D.I. Kontsept teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo apparata klassa mikro dlya resheniya issledovatel'skikh zadach [Concept of a micro-class remotely operated underwater vehicle for research tasks], *Nauchnye gorizonty* [Scientific Horizons], 2018, No. 10 (14), pp. 253-258. EDN YMQTTN.
8. Danilova S.K., Kuskov A.M., Kuskov I.M., Tarasov N.N. Model' dvizheniya i adaptivnogo upravleniya teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo apparata v slozhnoy dinamicheskoy sisteme [Model of movement and adaptive control of a remotely operated underwater vehicle in a complex dynamic system], *Morskoy vestnik* [Marine Bulletin], 2019, No. 2 (70), pp. 93-97. EDN KLTJLU.
9. Amiragov A.S., Nikulin D.A., Mikhaylov A.M., Komissarov A.A. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018612304 Rossiyskaya Federatsiya. Programmnое obespechenie bloka upravleniya i indikatsii teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo apparata: № 2017615431 [Certificate of State Registration of Computer Program No. 2018612304 Russian Fed-

- eration. Software for control and indication unit of a remotely operated underwater vehicle: No. 2017615431]: appl. 07.06.2017: publ. 15.02.2018; applicant Russian Federation, represented by the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. EDN GXLPLA.
10. Chursin Yu.A., Pavlichev V.V., Nurmukhametov R.A. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019666504 Rossiyskaya Federatsiya. Upravlenie dvizhitelyami TNPA: № 2019665395 [Certificate of State Registration of Computer Program No. 2019666504 Russian Federation. Propulsion control of ROVs: No. 2019665395: appl. 29.11.2019: publ. 11.12.2019; applicant National Research Tomsk Polytechnic University. EDN HSMYAO.
11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2023661444 Rossiyskaya Federatsiya. Programma dlya energeticheskoi optimal'nogo raspredeleniya upravlyayushchikh komand na dvizhitel'no-rulevoy kompleks teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo apparata: № 2023660819 [Certificate of State Registration of Computer Program No. 2023661444 Russian Federation. Program for energy-optimal distribution of control commands on the thruster-rudder complex of a remotely operated underwater vehicle: No. 2023660819]: appl. 29.05.2023: publ. 31.05.2023; applicant KASHALOT LLC. EDN RJADAH.
12. Palto V.S. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018612303 Rossiyskaya Federatsiya. Programma realizatsii matematicheskoy i imitatsionnoy modeley elektronnoy maketa teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo apparata: № 2017615459 [Certificate of State Registration of Computer Program No. 2018612303 Russian Federation. Program for Implementation of Mathematical and Simulation Models of the Electronic Layout of a Remotely Operated Underwater Vehicle: No. 2017615459]: appl. 07.06.2017: publ. 15.02.2018; applicant Russian Federation, represented by the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. EDN TSRKTO.
13. Aamir M., Rehman Z., Pu Y.-F., Ahmed A. and Abro W.A. Image Enhancement in Varying Light Conditions Based on Wavelet Transform, *2019 16th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, Chengdu, China, 2019*, pp. 317-322.
14. Sun T. and Jung C. Readability enhancement of low light images based on dual-tree complex wavelet transform, *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China, 2016*.
15. Espinosa A.R., McIntosh D., Albu A.B. An efficient approach for underwater image improvement: Deblurring, dehazing, and color correction, *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*, 2023, pp. 206-215.
16. Yadav S. and Raj K. Underwater Image Enhancement via Color Balance and Stationary Wavelet Based Fusion, *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangluru, India, 2020*, pp. 1-5.
17. Safina L.N., Shindor O.V. Tsvetokorreksiya podvodnykh snimkov na osnove veyvlet-preobrazovaniya [Color correction of underwater photos based on wavelet transform], *Izmereniya, avtomatizatsiya i modelirovanie v promyshlennosti i nauchnykh issledovaniyakh (IAMP-2024): Mater. XIX Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem, 30 oktyabrya - 1 noyabrya 2024 goda* [Measurements, Automation and Modeling in Industry and Scientific Research (IAMP-2024): Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists with International Participation, October 30 - November 1, 2024]. Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2024, pp. 176-178.
18. Fossen T.I. Guidance and control of oceanic vehicles. John Willei and Sons, 1994, 494 p.
19. Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A. Sistemy i ustroystva upravleniya podvodnykh robotov [Control systems and devices for underwater robots]. Moscow: Nauka, 2005, 270 p.
20. Aamir M., Rehman Z., Pu Y.-F., Ahmed A. and Abro W.A. Image Enhancement in Varying Light Conditions Based on Wavelet Transform, *2019 16th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, Chengdu, China, 2019*, pp. 317-322.
21. Sun T. and Jung C. Readability enhancement of low light images based on dual-tree complex wavelet transform, *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China, 2016*.
22. Espinosa A.R., McIntosh D., Albu A.B. An efficient approach for underwater image improvement: Deblurring, dehazing, and color correction, *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*, 2023, pp. 206-215.
23. Yadav S. and Raj K. Underwater Image Enhancement via Color Balance and Stationary Wavelet Based Fusion, *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangluru, India, 2020*, pp. 1-5.
24. Liyanage P., Kruglova L.V., Ranasingkhe N. Uluchshenie obrabotki izobrazheniy s pomoshch'yu modeli svertochnoy neyronnoy seti na osnove veyvletov [Image processing improvement with a wavelet-based convolutional neural network model], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2024, No. 6 (144).

Шиндор Ольга Владимировна – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: OVShindor@kpfu.ru; г. Казань, Россия; тел.: +79270301549; специалист кадрово-ресурсного центра ИТ, ИИ и робототехники; к.т.н.

Кокунин Петр Анатольевич – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: AKokunin@kpfu.ru; г. Казань, Россия; тел.: 8843422337576; директор центра превосходства Специальная робототехника и искусственный интеллект; к.т.н.; доцент.

Егорчев Антон Александрович – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: anton@egorchev.ru; г. Казань, Россия; тел.: 88432337609; директор Института вычислительной математики и информационных технологий; к.т.н.

Сафина Лилия Наилевна – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: LiliyaNSafina@kpfu.ru; тел.: +79372808187; г. Казань, Россия; лаборант УВП; магистрант.

Мурин Ян Сергеевич – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: murin007@list.ru; г. Казань, Россия; тел.: +793936396781; лаборант УВП; студент.

Shindor Olga Vladimirovna – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: OVShindor@kpfu.ru; Kazan, Russia; phone: +79270301549; specialist of the HR Resource Center for IT, AI and Robotics, Institute of Artificial Intelligence, Robotics and Systems Engineering; cand. of eng. sc.

Kokunin Petr Anatolyevich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: AKokunin@kpfu.ru; Kazan, Russia; phone: 8843422337576; director of the Center of Excellence Special Robotics and Artificial Intelligence; cand. of eng. sc.; associate professor.

Egorchev Anton Aleksandrovich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: anton@egorchev.ru; Kazan, Russia; phone: 88432337609; director of the Institute of Computational Mathematics and Information Technology; cand. of eng. sc.

Safina Liliya Nailevna – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: LiliyaNSafina@kpfu.ru; Kazan, Russia; phone: +79372808187; laboratory assistant, UVP; student.

Murin Yan Sergeevich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: murin007@list.ru; phone: +793936396781; Kazan, Russia; laboratory assistant, UVP; student.

Раздел IV. Нанотехнологии, электроника и радиотехника

УДК 621.396.67

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-237-247

В.А. Обуховец, Н.В. Самбуров

СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО СОГЛАСОВАНИЯ ДИПОЛЬНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Классический полуволновый диполь имеет достаточно малую рабочую полосу частот. В работе представлен комплексный способ расширения полосы частот дипольного излучателя. Эффект широкополосного согласования обеспечивается на основе принципа частной компенсации комплексной нагрузки. В качестве основы согласующего устройства используется способ согласования с помощью реактивного шлейфа, обладающего хорошим качеством согласования с комплексной нагрузкой при минимальных геометрических размерах. Особенностью способа является рассмотрение вопроса согласования единой конструкции "согласующее устройство – излучатель – рефлектор". Для этого необходим учет влияния как конструктивных элементов согласования линии передачи, так и взаимной реакции рефлектора и симметричного диполя. Целью работы является синтез конструкции симметричного дипольного излучателя с согласующим реактивным шлейфом. В работе представлена конструкция содержащая диполь, возбуждаемый от двухпроводной линии (одновременно являющейся его стойками), закороченной на конце. Данная двухпроводная линия, подключена в средней части к питающей коаксиальной линии. Рефлектор имеет сложную форму с целью обеспечения необходимого расстояния от диполя до рефлектора. Для этого форматизированна конструкция дипольного излучателя, определено количество, номенклатура и диапазон варьируемых параметров, сформулирована и верифицирована математическая модель. На основе данной модели проведены численные исследования уровня согласования конструкции в диапазоне варьируемых параметров. С использованием математической модели продемонстрирована возможность широкополосного согласования, найдены параметры первичной модели для электродинамического моделирования. На основе сформированной первичной модели проведен вычислительный эксперимент с помощью программного обеспечения для 3D электромагнитного моделирования (HFSS) с целью определения оптимальной геометрии и размеров конструкции излучателя. В качестве критерия оптимальности в одном случае выбрана максимальная величина полосы рабочих частот, в другом - максимальный коэффициент направленного действия. Эти случаи отражают практические задачи использования излучателей данного типа. Продемонстрирована возможность согласования в полосе частот не менее 80%. Приводятся результаты верификации математической модели, математического и электродинамического моделирования, а также макетирования излучателя.

Дипольные антенны; дипольный излучатель; широкополосные антенны; согласующая цепь; шлейф.

V.A. Obukhovets, N.V. Samburov

SYNTHESIS OF THE DESIGN OF BROADBAND MATCHING OF A DIPOLE RADIATOR

The classical half-wave dipole has a rather small operating frequency band. The paper presents a comprehensive method for extending the frequency band of a dipole radiator. The broadband matching effect is provided based on the principle of private compensation of complex load. As the basis of the matching device, a matching method using a reactive loop is used, which has a good matching quality with a complex load with minimal geometric dimensions. A feature of the method is the consideration of the issue of matching a single design "matching device – Radiator-reflector". For this, it is necessary to

take into account the influence of both the structural elements of the transmission line matching and the mutual reaction of the reflector and the symmetrical dipole. The Purpose of the work is to synthesize the design of a symmetrical dipole radiator with a matching reactive loop. The paper presents a design containing a dipole excited from a two-wire line (which is also its struts), shorted at the end. This two-wire line is connected in the middle part to the coaxial supply line. The reflector has a complex shape in order to provide the necessary distance from the dipole to the reflector. For this purpose, the design of the dipole radiator has been formatted, the number, nomenclature and range of variable parameters have been determined, and a mathematical model has been formulated and verified. Based on this model, numerical studies of the design alignment level in a range of variable parameters have been carried out. Using a mathematical model, the possibility of broadband matching is demonstrated, and the parameters of the primary model for electrodynamic modeling are found. Based on the formed primary model, a computational experiment was conducted using 3D electromagnetic simulation (HFSS) software in order to determine the optimal geometry and dimensions of the radiator structure. In one case, the maximum value of the operating frequency band was chosen as the criterion of optimality, in the other - the maximum directional coefficient. These cases reflect the practical tasks of using emitters of this type. The possibility of matching in a frequency band of at least 80% has been demonstrated. The results of verification of the mathematical model, mathematical and electrodynamic modeling, as well as the layout of the radiator are presented.

Dipole antennas; dipole radiator; broadband antennas; matching circuit; stub.

Введение. Дипольные излучатели получили широкое распространение в антенных устройствах СВЧ диапазона, в частности - фазированных антенных решетках (ФАР). Параметры направленности антенных элементов решетки должны соответствовать рабочей зоне углов ФАР, поэтому одним из требований к ним является слабая направленность. К слабонаправленным излучателям относится класс симметричных дипольных излучателей, в которых диполь расположен над рефлектором параллельно ему. Достоинствами таких излучателей является простота конструкции, минимальные массогабаритные характеристики, высокие значения КПД и электрическая прочность. ФАР обычно содержит множество элементов, поэтому вопросам технологической простоты и компактности конструкции возбуждения диполя, а также крепления его над рефлектором необходимо уделять особое внимание.

Классический полуволновый диполь имеет достаточно малую рабочую полосу частот (до 10%). Среди современных подходов к расширению полосы можно выделить способы, основанные на модификации плеч диполей: включение распределенных и сосредоточенных элементов [1, 2], реконфигурируемости [3, 4] и изменение формы [1, 5–7]. Другим подходом является использование специализированных симметрирующих согласующих цепей, среди которых следует выделить цепи на основе компланарных линий (CPW) и широкополосных симметрирующих фидеров [8–10]. Стоит отметить определенную условность в данном структурно-конструктивном обособлении способов, так как вышеописанные подходы могут быть взаимосвязаны и часто используются совместно [11–16].

Приведенные реализации вышеописанных подходов к расширению полосы частот дипольного излучателя демонстрируют, что современные тенденции основаны на использовании в антенной технике микрополосковых (МПП) технологий. Это обусловлено, в частности, технологическими преимуществами. Однако данные тенденции приводят к снижению механической и электрической прочности излучателей, а также делают их параметры чувствительными к климатическим условиям. Поэтому в некоторых приложениях актуальными являются классические (объемные) конструкции дипольных излучателей. При этом не все технические решения для широкополосного возбуждения МПП излучателей могут быть реализованы в классической конструкции (и наоборот) без потери их эффективности.

Известно, что параллельный шлейф в классическом виде – это узкополосное согласующее устройство. Ниже представлен комплексный способ расширения полосы частот дипольного излучателя. Особенностью способа является рассмотрение вопроса согласования единой конструкции "согласующее устройство – излучатель – рефлектор". Причем в качестве основы согласующего устройства используется способ согласования с помощью реактивного шлейфа, обладающего хорошим качеством согласования с комплексной нагрузкой при минимальных размерах.

Целью работы является синтез конструкции симметричного вибраторного излучателя с согласующим реактивным шлейфом.

Описание конструкции. Известно, что с помощью шлейфа параллельного типа, включенного в линию передачи (ЛП) нагруженную на комплексную нагрузку, можно обеспечить режим бегущей волны в линии при любом сопротивлении нагрузки и волновом сопротивлении линии [17]. Данный способ, который также может использоваться и для согласования диполей любых размеров, удачно реализуется на ЛП типа двухпроводная линия (так называемое *согласование способом В.В. Татарина* [18]), что позволяет корректировать точку подключения шлейфа (для компенсации действительной части проводимости диполя), а также не требует наличия симметрирующего устройства для питания плеч диполя. Однако этот способ является узкополосным, т.к. место включения и размеры шлейфа определяются частотой сигнала. В дополнении к этому практические конструкции дипольных излучателей обычно имеют эффективные размеры близкие к резонансным, что также исключает широкополосное согласование по причине частотной зависимости входного сопротивления. Непосредственно двухпроводная ЛП (в отличие от коаксиальной) не является распространенным типом фидерной линии в диапазоне СВЧ, что ограничивает практическое её использование.

С другой стороны, известный способ широкополосного согласования, использующий *принцип частотной компенсации*, также может быть основан на использовании параллельного шлейфа [17]. В этом случае частотная зависимость реактивной проводимости шлейфа должна быть обратной зависимости проводимости нагрузки, включенной параллельно ему. Однако этот способ применим в том случае, когда значение действительной части проводимости близко к значению, обратному волновому сопротивлению линии. Задачу широкополосного согласования коаксиального фидера с излучателем нельзя рассматривать отдельно от конструктивных особенностей плеч вибратора, согласующего и симметрирующего устройства, рефлектора и его расположения.

Рассмотрим конструкцию дипольного излучателя (рис. 1) содержащего конструктивные и согласующие элементы. Излучатель представляет диполь, возбуждаемый от двухпроводной линии (одновременно являющейся его стойками), закороченной на конце (рис. 1). Двухпроводная линия, подключенная в средней части к коаксиальной линии 3, делится на два отрезка двухпроводной линии 1 и 2. Отрезок 1 – питает плечи диполя 4, отрезок 2 – закорочен на конце рефлектором 5. Рефлектор 5 имеет сложную форму с целью обеспечения необходимого расстояния от диполя до рефлектора (независимо от точки закорачивания отрезка 2).

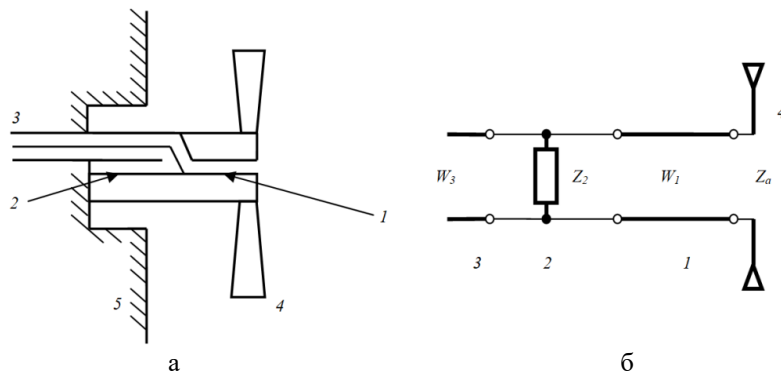


Рис. 1. Конструкция (а) и эквивалентная электрическая схема (б) дипольного излучателя

Электрическая схема (рис. 1,б) представляет параллельно включенное сопротивление, определяемое сопротивлением короткозамкнутого двухпроводного шлейфа 2 (Z_2) и входным сопротивлением диполя 4 (Z_a), включенного через двухпроводную линию 1 с волновым сопротивлением W_1 .

Возможность многошагового параметрического синтеза действующих размеров конструкции излучателя (например, посредством электродинамического анализа) ограничивается вычислительными и временными ресурсами, определяемыми количеством варьируемых параметров, объемом и дискретностью проводимых исследований в частотной области. Поэтому необходимо снизить количество и диапазон варьируемых параметров (степеней свободы синтеза) и широко использовать возможности математического анализа, например, для формирования первичной модели для электродинамического моделирования.

Степенями свободы в процессе синтеза являются конструктивные особенности линий передач 1 и 2 (их длина и форма), а также конструкция плеч диполя (длина, форма) и расстояние от них до рефлектора (определяемые входное сопротивление диполя). В процессе синтеза первичной модели использованы следующие принципы, определяемые в том числе и конструкторско-технологическими соображениями:

1) отрезок двухпроводной линии 1 повторяет конструкцию основания плеч диполей 4, что способствует улучшению согласования линии и диполя;

2) форма плеч диполей – усеченный конус (с углом при вершине α), что способствует снижению активной составляющей и частотной зависимости реактивной составляющей входного сопротивления (а значит и уменьшению волнового сопротивления диполя);

3) длина плеч диполя (l) принимается близкой к размерам полуволнового диполя ($l \approx \lambda_0/4$, где λ_0 – длина волны центральной частоты диапазона), что способствует уменьшению реактивной части входного сопротивления (а значит и уменьшению волнового сопротивления);

4) волновое сопротивление подводящей линии 3 W_3 принимается равным типовому волновому сопротивлению коаксиальной линии передачи: $W_3 = 50$ Ом;

5) линии передачи 1 и 2 имеют одинаковые сечения, при этом они представляют единую прочную несущую конструкцию (т.е. стойки) для плеч симметричного диполя. Таким образом действующие поперечные размеры ЛП 1 и 2 (расстояние между стойками a и их диаметр d) выбираются из прочностных соображений, в дополнении должно обеспечиваться возможность подвода внутри стойки ЛП 3. При этом волновые сопротивления линий равные: $W_1 = W_2$, а диаметр основания диполя равен значению диаметра d (согласно п.1);

6) подводящая коаксиальная линия 3 проходит внутри одной из стоек и таким образом запитывает одновременно две соосно-подключенные симметричные ЛП 1 и 2. Это способствует компенсации токов, текущих по наружной поверхности коаксиальной линии, и улучшает симметрирование токов;

7) с целью обеспечения однонаправленности излучения расстояние от диполя до рефлектора (h) принимается близкой к четверти волны ($h \approx \lambda_0/4$).

Таким образом удастся сократить количество варьируемых параметров до следующего набора: d , a , h , α , l_1 и l_2 (длины ЛП 1 и 2, соответственно), а также несколько ограничить диапазоны их значений. Для формирования (обоснования) параметров первичной модели использовано математическое моделирование.

Математическая модель. Изображенная на рис. 1 конструкция включает в себя как отрезки длинных линий, так и дипольный излучатель сложной формы, взаимодействующий со своим зеркальным отражением. Таким образом для построения модели использован математический аппарат теории длинных линий и метод наведенных ЭДС. Для исследования предложенной конструкции вычисляется комплексное входное сопротивление Z , подключаемое к подводящей ЛП 3:

$$Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (1)$$

где Z_1 – входное сопротивление диполя 4 (запитанного по ЛП 1) в точке подключения шлейфа 2, Z_2 – сопротивление короткозамкнутого шлейфа 2.

Входящие в (1) значения сопротивлений Z_1 и Z_2 находятся на основе теории длинных линий [19]:

$$\begin{aligned} Z_1 &= W_1 \frac{Z_a \cos k_1 l_1 + j W_1 \sin k_1 l_1}{W_1 \cos k_1 l_1 + j Z_a \sin k_1 l_1}, \\ Z_2 &= j W_1 \operatorname{tg} k_2 l_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где Z_a – полное входное сопротивление диполя 4;

k , k_1 , k_2 – волновые числа соответственно для открытого пространства, линий передачи 1 и 2.

Согласно [19] биконический диполь с длиной плеча l может рассматриваться как длинная линия с волновым сопротивлением W_b , нагруженная на сопротивление Z_n . Таким образом, входное сопротивление диполя 4 Z_a , входящее в (2), определяется следующим образом:

$$Z_a = W_b \frac{Z_n \cos kl + j W_b \sin kl}{W_b \cos kl + j Z_n \sin kl},$$

где W_b – волновое сопротивление диполя над рефлектором,

$$Z_n = \frac{W_b^2}{Z_{11} - Z_{12}}.$$

В выражении комплексные значения сопротивления излучения диполя $Z_{11} = R_{11} + jX_{11}$ и взаимное наведенное сопротивление излучения $Z_{12} = R_{12} + jX_{12}$ (от «мнимого» диполя за счет наличия рефлектора 5) можно найти по известным выражениям из [20]. При расчете волнового сопротивления диполя W_b также учитывается влияние «мнимого» диполя следующим образом:

$$W_b = W \sqrt{1 + \frac{X_{1нав}}{kW}},$$

$$\text{где } X_{1нав} = \frac{-2X_{12}}{l \left(1 - \frac{\sin 2kl}{2kl} \right)},$$

$W = 276 \lg \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{4} \right)$ – волновое сопротивление биконического диполя с полным углом при вершине α [19].

Для рассматриваемого здесь случая выражения для расчета собственных и взаимных сопротивлений Z_{11} и Z_{12} весьма громоздки – содержат 72 слагаемых (в технической литературе распространены формульные выражения для простейшего случая $l = \frac{\lambda}{4}$).

Поэтому данные выражения, а также окончательное выражение (в общем виде) для величины Z , полученное на основе (1), здесь не приводятся.

Непосредственным объектом численного исследования является параметр, характеризующий согласование конструкции с линией 3, а именно модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$:

$$|S_{11}| = \sqrt{\frac{(R - W_3)^2 - X^2}{(R + W_3)^2 + X^2}},$$

где R и X – действительная и мнимая части величины Z ($Z = R + jX$),

$W_3 = 50$ Ом – волновое сопротивление подводящей линии 3.

Моделирование проведено в среде MATLAB. Прежде чем перейти к анализу результатов в связи со сложностью и громоздкостью модели, с целью обеспечения достоверности результатов, модель подверглась верификации. Верификация заключалась в подтверждении общей модели посредством исследования её (и её внутренних переменных) для частных широко исследованных конструкций дипольных излучателей и сравнении результатов с данными из распространённых источников. Некоторые результаты верификационных исследований – величин Z_{11} и Z_{12} (для случая параллельных тонких регулярных диполей с нулевым взаимным осевым сдвигом) совпадают с известными графическими данными из специализированной литературы (см. [20] и рис. 2). Полученная в результате исследований согласования варианта конструкции с нулевым размером ЛП 1 и отсутствием рефлектора зона возможного согласования совпадают с принципом согласования одиночного диполя с согласующим шунтом (см. рис. 3,а). На рис. 3,б показано расширение полосы данного варианта конструкции при конусообразности плеч диполя.

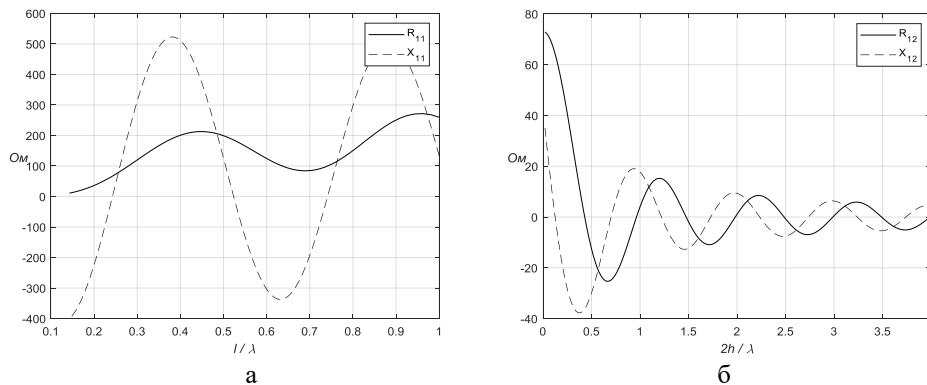


Рис. 2. Результаты верификации модели: значения величин Z_{11} (а) и Z_{12} (б) для частного случая: $\alpha = 0$, $\frac{l}{d} = 3000$ и нулевого осевого сдвига диполей

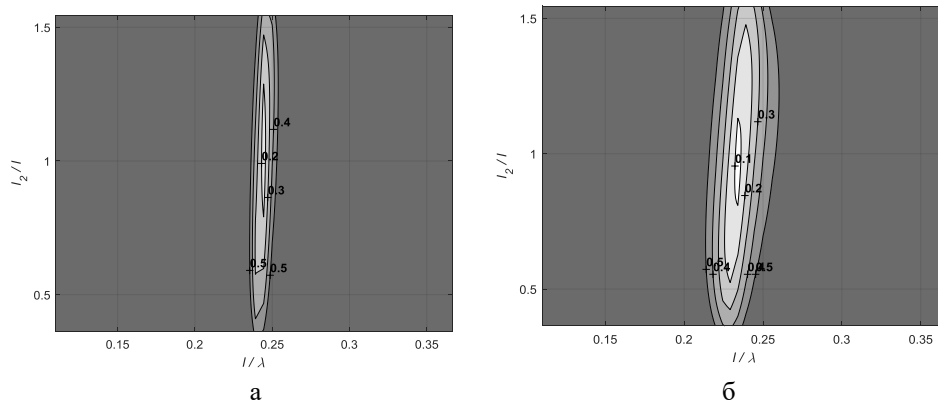


Рис. 3. Результаты верификации модели: топограмма значения величины $|S_{11}|$ для частного случая $l_1 = 0$, $h = \infty$, $\frac{d}{l} = 0,145$, $\frac{a}{l} = 0,182$: а – $\alpha = 0$, б – $\alpha = 7^\circ$

Проведены исследования, объём которых обоснован набором и диапазоном варьируемых параметров. Некоторые результаты показаны на рис. 4, где приведена серия топограмм (картографических изображений) характеризующих качество согласования конструкции в зависимости от относительных значений длины плеч диполя ($\frac{l}{\lambda}$) и длины

линии 2 ($\frac{l_2}{l}$) для фиксированных значений $\frac{l_1}{l} = 0,76$ и $\frac{l_1}{l} = 0,63$, $\frac{h}{l} = 1,56$ и $\frac{h}{l} = 1,29$.

Другие значения параметров модели: $\frac{d}{l} = 0,145$, $\frac{a}{l} = 0,182$, $\alpha = 7^\circ$. На топограммах показана величина $|S_{11}|$ – градациями яркости с изолиниями дискретных значений. Область возможного широкополосного согласования (рис. 4,а) ограничена штриховой линией (использован частный критерий $|S_{11}| \leq 0,3$). Параметры модели из данной области определяют первичную модель для электродинамического моделирования.

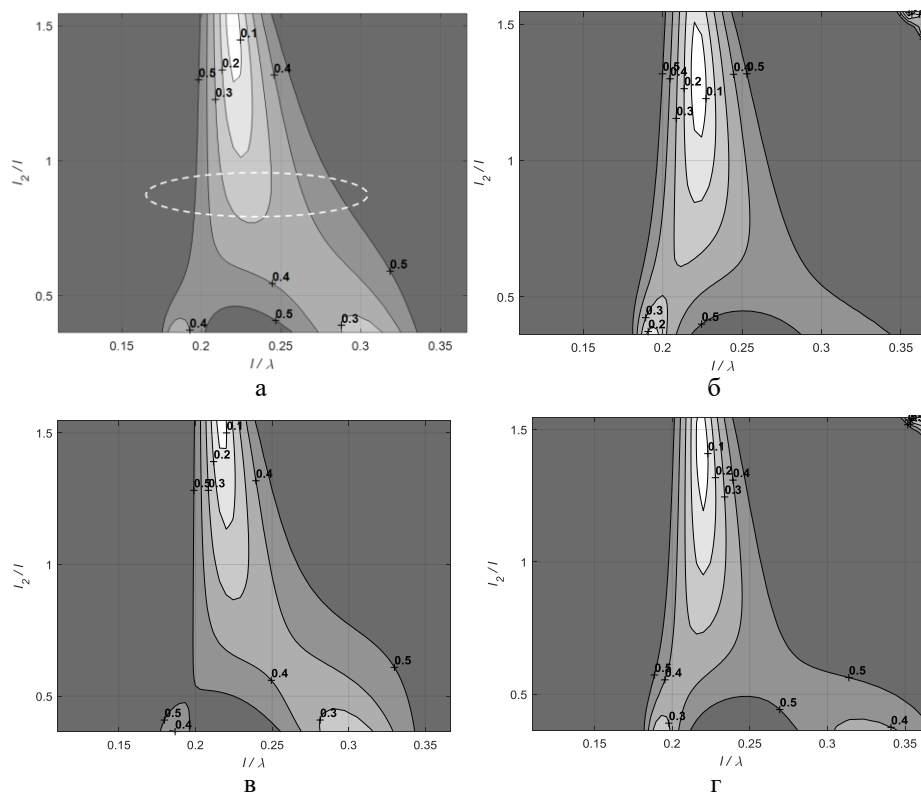


Рис. 4. Топограмма величины $|S_{11}|$: а – $\frac{l_1}{l} = 0,76$, $\frac{h}{l} = 1,56$; б – $\frac{l_1}{l} = 0,63$, $\frac{h}{l} = 1,56$;

$$в – \frac{l_1}{l} = 0,76, \frac{h}{l} = 1,29; г – \frac{l_1}{l} = 0,63, \frac{h}{l} = 1,29$$

Таким образом, в результате математического моделирования продемонстрирована возможность широкополосного согласования. Однако при формировании математической модели и её составляющих использованы доступные выражения близких конструктивных аналогов, которые не учитывают особенностей конструкции в полной мере. Так в математической модели не в полной мере произведен учёт реальной формы плеч (а именно – усеченный конус), эффекты симметрирования и возбуждения диполя от линии передачи, взаимодействия открытой двухпроводной линии с рефлектором и прочее. Однако использование данных упрощенных моделей с целью формирования начальных параметров для электродинамического моделирования конструкции вполне допустимо.

Результаты моделирования. На основе сформированной первичной модели проведены обширные численные исследования с помощью программного обеспечения для 3D электромагнитного симулирования (HFSS) с целью определения оптимальной геометрии и размеров конструкции излучателя. В качестве первичной модели взята модель,

с параметрами выявленными выше, в результате математического моделирования: $\frac{l_1}{l} = 0,76$, $\frac{h}{l} = 1,56$, $\frac{d}{l} = 0,145$, $\frac{a}{l} = 0,182$, $\alpha = 7^\circ$. Рассмотрены два случая оптимизации действующих размеров конструкции, отражает практические задачи использования излучателей данного типа [21]. В качестве критерия оптимальности в одном случае выбрана максимальная величина полосы рабочих частот (вариант 1), в другом – максимальный коэффициент направленного действия (вариант 2). Установлено, что наилучшими характеристиками обладает варианты конструкции с параметрами, указанными в табл. 1.

Таблица 1

Действующие размеры вариантов конструкции излучателя

	$\frac{l_1}{l}$	$\frac{l_2}{l}$	$\frac{h}{l}$	$\frac{d}{l}$	$\frac{a}{l}$	α
Вариант 1	0,745	0,818	1,56	0,145	0,182	7°
Вариант 2	0,709	0,854	1,29	0,145	0,182	7°

На рис. 5 и 6 показаны зависимости величин КСВН и КНД излучателя от относительной длины плеч $\frac{l}{\lambda}$. Графики для вариантов 1 и 2 обозначены соответствующими цифрами. В результате исследования конструкции зафиксированы следующие значения:

- ♦ относительная полоса рабочих частот по уровню КСВН, равном 2, ($S_{11} = -9,5$ дБ) до 84%;
- ♦ значение КНД до 5,4 дБ.

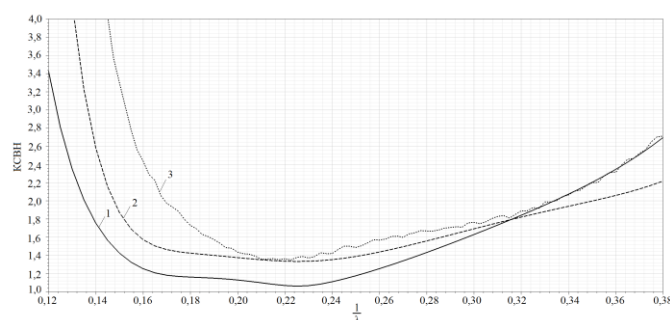


Рис. 5. Зависимость значения КСВН от $\frac{l}{\lambda}$ для двух вариантов модели (1 и 2) и макета (3) конструкции излучателя

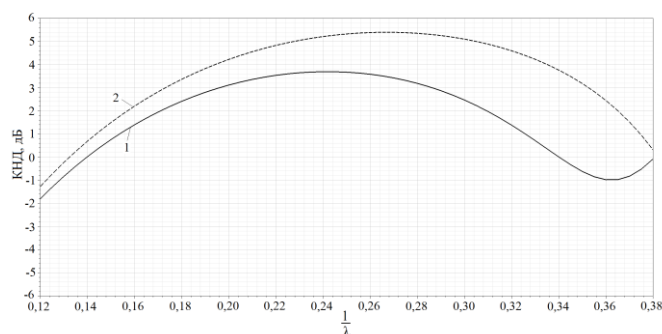


Рис. 6. Зависимость значения КНД от $\frac{l}{\lambda}$ для двух вариантов модели (1 и 2) конструкции излучателя

Из приведенных зависимостей также видно, что модернизация конструкции варианта 1 с целью повышения величины КНД приводит к сужению полосы рабочих частот. Таким образом выбор действующих размеров должен осуществляться с учетом конкретных практических особенностей использования излучателя, с учетом необходимой полосы частот, допустимых значений согласования и КНД, а также иных условий.

С целью подтверждения результатов изготовлен макет конструкции по варианту 2 (рис. 7). Материал макета – алюминий (ЛП 1 и 2, плечи диполя 4, рефлектор 5), для соединения конструктивных элементов широко использована пайка. ЛП 3 изготовлена в виде коаксиальной воздушной линии, содержащей центрирующие шайбы из фторопласта, для сборки использованы технологические отверстия в стойках. Подключение к линии 3 осуществлено через коаксиальный соединитель типа III (тип N с метрической резьбой).

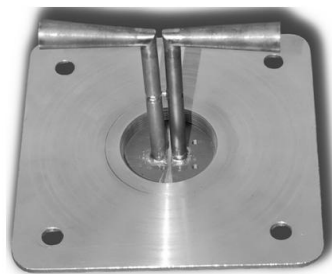


Рис. 7. Макет дипольного излучателя

Результаты макетирования представлены кривой 3 на рис. 5. Форма кривой 3 и центральная частота совпадают с результатами моделирования (кривая 2), однако по заданному уровню согласования полоса частот отличается на 15%.

Закключение. Синтезирована конструкция симметричного вибраторного излучателя с согласующим реактивным шлейфом. Продемонстрирована возможность работы излучателя в диапазоне частот 80% (по уровню согласования $S_{11} = -9,5$ дБ). Показана возможность увеличения значения КНД на 1...4 дБ при одновременном снижении полосы частот. Особенностью конструкции являются малые габаритные размеры и способ питания – от стандартной коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Milligan T.A. Modern Antenna Design: Second Edition // Modern Antenna Design. – Second ed. – 2005. – P. 1-614. – DOI: 10.1002/0471720615. – EDN SSWHRH.
2. Balanis C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. – 4th ed. – John Wiley & Sons, 2016.
3. Qin P.-Y., Weily A.R., Guo Y.J., Bird T.S. and Liang C.-H. Frequency Reconfigurable Quasi-Yagi Folded Dipole Antenna // in IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – Aug. 2010. – Vol. 58, No. 8. – P. 2742-2747. – DOI: 10.1109/TAP.2010.2050455.
4. Обуховец В.А. Реконфигурируемые микрополосковые антенные системы // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-2. – С. 159-160. – EDN XVHHJG.
5. Chen H.-D. Broadband CPW-fed square slot antennas with a widened tuning stub // IEEE Trans. Antennas Propag. – Aug. 2003. – Vol. 51. – P. 1982-1986.
6. Chen H.-D. and Chen H.-T. A CPW-fed dual-frequency monopole antenna // IEEE Trans. Antennas Propag. – Apr. 2004. – Vol. 52. – P. 978-982.
7. Kuo F.-Y., Chou H.-T., Hsu H.-T., Chou H.-H. and Nepa P. A Novel Dipole Antenna Design With an Over 100% Operational Bandwidth // in IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – Aug. 2010. – Vol. 58, No. 8. – P. 2737-2741. – DOI: 10.1109/TAP.2010.2050434.
8. Kim J.I., Kim J.M., Yoon Y.J., and Pyo C.S. Wideband printed fat dipole fed by tapered microstrip balun // in Proc. IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp. – Jun. 2003. – Vol. 3. – P. 32-35.
9. Guo Y.X., Zhang Z.Y., Ong L.C., and Chia M.Y.W. A new balanced UWB planar antenna // in Proc. Eur. Conf. on Wireless Technology. – Oct. 2005. – P. 515-517.
10. He Q.-Q., Wang B.-Z., and He J. Wideband and dual-band design of a printed dipole antenna // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. – 2008. – Vol. 7. – P. 1-4.
11. Обуховец В.А. Плоскостные микрополосковые излучатели с расширенным диапазоном частот // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2023. – № 5. – С. 59-60.

12. Горемыкин Е.В., Петров Б.М., Костромитин Г.И. Логопериодические антенны с укороченными вибраторами // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2001. – № 1. – С. 24-30.
13. Пеньковская Т.К., Геворкян А.В., Юханов Ю.В. Варианты реализации диаграммообразующей схемы фазированной антенной подрешетки на основе низкопрофильных печатных дипольных антенн // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2022): Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. В двух томах, Таганрог, 08–10 июня 2022 года. – Таганрог: ЮФУ, 2022. – С. 264-271.
14. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V. A Low Profile Dual-Polarized Tightly Coupled Dipole Array of C-X-Band // Proceedings - 2020 7th All-Russian Microwave Conference, RMC 2020: 7, Moscow, 25–27 ноября 2020 года. – Moscow, 2020. – P. 140-142.
15. Gevorkyan A.V., Yukhanov Y.V. 5.11:1 Bandwidth Dual Polarized Dipole Antenna // 2018 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean, RADIO 2018, Wolmar, 15–18 октября 2018 года. – Wolmar, 2018. – P. 8572299.
16. Семенихин А.И., Семенихина Д.В., Юханов Ю.В. Низкопрофильная двухполяризационная антенная решетка сильно связанных диполей С-Х-диапазонов // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – № 12. – С. 14.
17. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны: учебник для вузов / ред. Воскресенский Д.И. – 3-е изд. – М.: Радиотехника, 2008. – 384 с.
18. Дробкин А.Л., Зузенко В.Л. Антенно-фидерные устройства. – М.: Сов. радио, 1961.
19. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства: учеб. пособие для вузов связи. – М.: Связь, 1977.
20. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн. – М.: Связьиздат, 1957.
21. Алексеев Ю.И., Белецкий А.А., Бровченко С.П. [и др.]. Радиоэлектронные системы локации и связи: Коллективная монография / под ред. В.А. Обуховца. – М.: Радиотехника, 2008. – 208 с.

REFERENCES

1. Milligan T.A. Modern Antenna Design: Second Edition, *Modern Antenna Design*. Second ed., 2005, pp. 1-614. DOI: 10.1002/0471720615. – EDN SSWHRH.
2. Balanis C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th ed. John Wiley & Sons, 2016.
3. Qin P.-Y., Weily A.R., Guo Y.J., Bird T.S. and Liang C.-H. Frequency Reconfigurable Quasi-Yagi Folded Dipole Antenna, in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Aug. 2010, Vol. 58, No. 8, pp. 2742-2747. DOI: 10.1109/TAP.2010.2050455.
4. Obukhovets V.A. Rekonfiguriruyemye mikropoloskovye antennnye sistemy [Reconfigurable microstrip antenna systems], *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii* [Microwave engineering and telecommunication technologies], 2020, No. 1-2, pp. 159-160. EDN XVHHJG.
5. Chen H.-D. Broadband CPW-fed square slot antennas with a widened tuning stub, *IEEE Trans. Antennas Propag.* Aug. 1982-1986, Vol. 51, pp. 1982-1986.
6. Chen H.-D. and Chen H.-T. A CPW-fed dual-frequency monopole antenna, *IEEE Trans. Antennas Propag.* Apr. 2004, Vol. 52, pp. 978-982.
7. Kuo F.-Y., Chou H.-T., Hsu H.-T., Chou H.-H. and Nepa P. A Novel Dipole Antenna Design With an Over 100% Operational Bandwidth, in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Aug. 2010, Vol. 58, No. 8, pp. 2737-2741. DOI: 10.1109/TAP.2010.2050434.
8. Kim J.I., Kim J.M., Yoon Y.J., and Pyo C.S. Wideband printed fat dipole fed by tapered microstrip balun, in *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp.*, Jun. 2003, Vol. 3, pp. 32-35.
9. Guo Y.X., Zhang Z.Y., Ong L.C., and Chia M.Y.W. A new balanced UWB planar antenna, in *Proc. Eur. Conf. on Wireless Technology*, Oct. 2005, pp. 515-517.
10. He Q.-Q., Wang B.-Z., and He J. Wideband and dual-band design of a printed dipole antenna, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2008, Vol. 7, pp. 1-4.
11. Obukhovets V.A. Planarnye mikropoloskovye izluchateli s rasshirennym diapazonom chastot [Planar microstrip emitters with an extended frequency range], *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii* [Microwave engineering and telecommunication technologies], 2023, No. 5, pp. 59-60.
12. Goremykin E.V., Petrov B.M., Kostromitin G.I. Logoperiodicheskie anteny s ukorochennymi vibratoryami, *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika*, 2001, No. 1, pp. 24-30.
13. Pen'kovskaya T.K., Gevorkyan A.V., Yukhanov Yu.V. Varianty realizatsii diagrammoobrazuyushchey skhemy fazirovannoy antennoy podreshetki na osnove nizkopofil'nykh pechatnykh dipol'nykh anten [Implementation options for a beam-forming scheme of a phased antenna subarray based on low-profile printed dipole antennas], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii* (KomTekh-2022): Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. V dvukh tomakh, Taganrog, 08–10 iyunya 2022 goda [Computer and in-

- formation technologies in science, engineering and management (KomTech-2022): Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation. In two volumes, Taganrog, June 08–10, 2022]. Taganrog: YuFU, 2022, pp. 264-271.
14. *Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V.* A Low Profile Dual-Polarized Tightly Coupled Dipole Array of C-X-Band, Proceedings - 2020 7th All-Russian Microwave Conference, RMC 2020: 7, Moscow, 25–27 November 2020. Moscow, 2020, pp. 140-142.
 15. *Gevorkyan A.V., Yukhanov Y.V.* 5.11:1 Bandwidth Dual Polarized Dipole Antenna, 2018 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean, RADIO 2018, Wolmar, 15–18 October 2018. Wolmar, 2018, pp. 8572299.
 16. *Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Yu.V.* Nizkoprofil'naya dvukhpolyarizatsionnaya antennaya reshetka sil'no svyazannykh dipoley S-Kh-diapazonov [Low-profile dual-polarization antenna array of strongly coupled C-X-band dipoles], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2020, No. 12, pp. 14.
 17. *Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I.* Ustroystva SVCh i antennoy: uchebnyy dlya vuzov [Microwave devices and antennas: a textbook for universities], ed. by Voskresenskiy D.I. 3rd ed. Moscow: Radiotekhnika, 2008, 384 p.
 18. *Drabkin A.L., Zuzenko V.L.* Antennofidernyye ustroystva [Antenna-feeder devices]. Moscow: Sov. radio, 1961.
 19. *Fradin A.Z.* Antennofidernyye ustroystva: ucheb. posobie dlya vuzov svyazi [Antenna-feeder devices: a textbook for communications universities]. Moscow: Svyaz', 1977.
 20. *Ayzenberg G.Z.* Antennyy ul'trakorotkikh voln [Ultrashort wave antennas]. Moscow: Svyaz'izdat, 1957.
 21. *Alekseev Yu.I., Beletskiy A.A., Brovchenko S.P.* [i dr.]. Radioelektronnyye sistemy lokatsii i svyazi: Kollektivnaya monografiya [Radioelectronic systems of location and communication: Collective monograph], pod red. V.A. Obukhovtsova. Moscow: Radiotekhnika, 2008, 208 p.

Обуховец Виктор Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: vaobuhovec@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; д.т.н.; профессор.

Самбуров Николай Викторович – АО «Тайфун»; e-mail: samburov.n.v@yandex.ru; г. Калуга, Россия; тел.: +79605181406; начальник отдела.

Obukhovets Victor Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: vaobuhovec@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371733; the department of antennas and radio transmitting devices; dr. of eng. sc.; professor.

Samburov Nikolai Viktorovich – TYPHOON JSC; e-mail: samburov.n.v@yandex.ru; Kaluga, Russia; phone: +79605181406; head of department.

УДК 621.391

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-247-255

А.В. Андрианов, А.Н. Зикий, А.С. Кочубей

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СМЕСИ СИГНАЛА И ШУМА НА ВЫХОДЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО ПРИЁМНИКА

Проведено экспериментальное исследование статистических параметров смеси сигнала и шума на выходе логарифмического приёмника: среднего, среднеквадратического отклонения, моды, медианы, коэффициентов асимметрии и эксцесса. Наличие этих параметров распределения позволяет аппроксимировать функцию распределения вероятностей смеси сигнала и шума рядом Эдживорта из четырёх членов. Логарифмические приёмники являются важной составной частью систем радиосвязи, радионавигации, радиолокации и радиоэлектронной борьбы. Они определяют такие важные характеристики, как частотный и динамический диапазон, чувствительность и помехоустойчивость. Целью данной работы является уточнение модели смеси сигнала и шума на выходе логарифмического приёмника. В большинстве известных публикаций использовано предположение о нормальном законе распределения смеси сигнала и шума на выходе логарифмического приёмника. Уточнение модели смеси сигнала и шума заключается в том, что данное распределение описывается аналитически рядом Эдживорта, а коэффициенты ряда Эдживорта измерены экспериментально с помощью макета логарифмического приёмника и цифрового осциллографа.

При этом среднее значение и среднеквадратическое отклонение измерены непосредственно и индицируются на экране осциллографа, а коэффициенты асимметрии и эксцесса получены путём обработки массива данных, записанных из осциллографа. В качестве средства обработки массива данных использована программа MATLAB. Для иллюстрации результатов проведённых экспериментов приведены скриншоты с экрана осциллографа, на которых изображены осциллограммы и гистограммы смеси сигнала и шума. Получены следующие параметры распределения: – среднее значение меняется от 671 до 1938 мВ; – среднеквадратическое значение меняется от 23,51 мВ до 0,553 мВ; – коэффициент асимметрии меняется от минус 0,078 до 0,313; – коэффициент эксцесса меняется от 2,394 до 3,471. Полученные результаты позволяют построить характеристики обнаружения логарифмического приёмника и оценить вероятность ложной тревоги.

Логарифмический приёмник; логарифмический детектор; гистограммы; параметры функций распределения вероятностей смеси сигнала и шума.

A.V. Andrianov, A.N. Zikiy, A.S. Kochubey

CHARACTERISTICS OF THE SIGNAL AND NOISE MIXTURE AT THE OUTPUT OF A LOGARITHMIC RECEIVER

An experimental study of the statistical parameters of a mixture of signal and noise at the output of a logarithmic receiver was carried out: mean, standard deviation, mode, median, coefficients of asymmetry and kurtosis. The presence of these distribution parameters makes it possible to approximate the probability distribution function of a mixture of signal and noise by the Edgeworth series of four terms. Logarithmic receivers are an important component of radio communication, radio navigation, radar and electronic warfare systems. They determine important characteristics such as frequency and dynamic range, sensitivity and noise immunity. The purpose of this work is to refine the model of a mixture of signal and noise at the output of a logarithmic receiver. Most well-known publications use the assumption of a normal distribution law of a mixture of signal and noise at the output of a logarithmic receiver. The refinement of the signal-noise mixture model lies in the fact that this distribution is described analytically by the Edgeworth series, and the coefficients of the Edgeworth series are measured experimentally using a mock-up of a logarithmic receiver and a digital oscilloscope. In this case, the average value and standard deviation are measured directly and displayed on the oscilloscope screen, and the coefficients of asymmetry and kurtosis are obtained by processing an array of data recorded from the oscilloscope. The MATLAB program is used as a means of processing an array of data. To illustrate the results of the experiments, screenshots from the oscilloscope screen are shown, which depict oscillograms and histograms of a mixture of signal and noise. The following distribution parameters are obtained: – the average value varies from 671 to 1938 mV; – the RMS value varies from 23.51 mV to 0.553 mV; – the coefficient of asymmetry varies from minus 0.078 to 0.313; – the kurtosis coefficient varies from 2.394 to 3.471. The results obtained allow us to build the detection characteristics of a logarithmic receiver and estimate the probability of a false alarm.

Logarithmic receiver; logarithmic detector; histograms; parameters of probability distribution functions of a mixture of signal and noise.

Введение. Знание плотности распределения вероятностей смеси сигнала и шума позволяет построить характеристики обнаружения. Знание плотности распределения шума позволяет рассчитать вероятность ложной тревоги обнаружителя, поэтому исследование статистических характеристик смеси сигнала и шума на выходе приёмника является важным.

По логарифмическим усилителям и детекторам имеются многочисленные публикации, в том числе монографии [1–3], учебные пособия [4–5], статьи, однако статистическим характеристикам смеси сигнала и шума на выходе логарифмического приёмника не уделяется должного внимания. В работе [6] исследован коэффициент шума ЛУД, в работе [7] исследованы искажения формы импульсов на выходе ЛУД. В работах [8–10] рассмотрены вопросы схемотехники ЛУД. В работах [11–13] изучены динамический диапазон и пропускная способность ЛУД. В работе [14] проведена аппроксимация амплитудной характеристики ЛУД. В работах [15, 16] проведён обзор микросхем для ЛУД.

В результате появления и широкого распространения микросхем логарифмических усилителей-детекторов (ЛУД) они всё чаще применяются в приёмниках различных диапазонов частот, в анализаторах спектра, в измерителях мощности, в анализаторах цепей. Именно они определяют шумовую составляющую погрешности измерений, поэтому ис-

следование плотности распределения вероятностей смеси сигнала и шума на выходе ЛУД является актуальным. К сожалению, в доступных источниках результаты такого исследования не нашли должного отражения.

Схема и конструкция [17]. На рис. 1 приведена функциональная схема двухканального приёмника, разработанного в соответствии с заданными требованиями. Приёмник состоит из двух двухканальных переключателей A1 и A3, трактовых фильтров A4 и A6, управляемых аттенуаторов A7, A8, малошумящих усилителей A9-A12, направленных ответвителей A13, A14, детекторов A15 и A16, логарифмических видеоусилителей A17 и A18.

Переключатели A1, A3 и аттенуаторы A7, A8 выполнены на pin-диодах типа 2A553A-3. Фильтры A4 и A6 выполнены на микрополосковых линиях по схеме шлейфового фильтра. В качестве малошумящих усилителей использованы микросхемы AMMP-5620. Детекторы выполнены на диодах с барьером Шотки типа 2A131A-3. Логарифмические видеоусилители A17, A18 выполнены на микросхемах типа AD8309.

На плате управления установлены три микросхемы типа MADRC0005 и одна микросхема стабилизатора напряжения 142EH6A с выходным напряжением ± 5 В.

Конструктивно приёмник выполнен в виде модуля врубной конструкции размером $170 \times 200 \times 40$ мм. При этом на передней панели блока размещены три входных соединителя СВЧ и два выходных соединителя СВЧ, выходы "видео", а также низкочастотный соединитель для подачи питания и управления. На задней стенке блока установлены два штыря для фиксации положения блока в кассете.

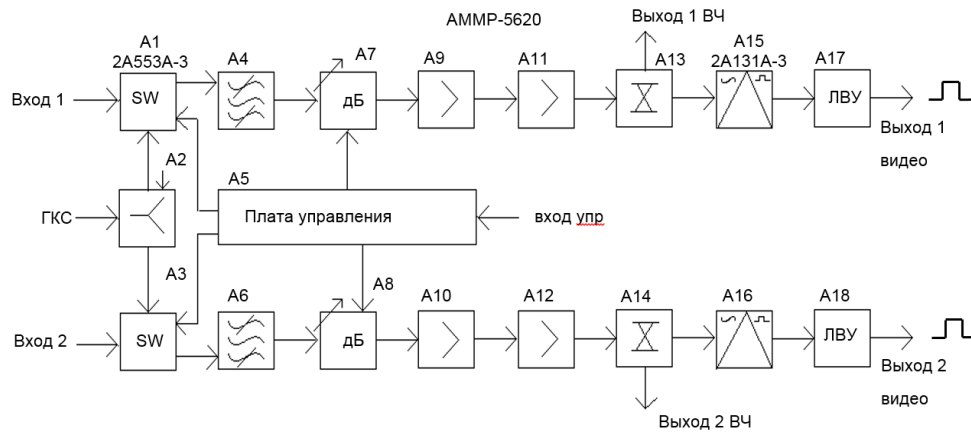


Рис. 1. Функциональная схема приёмника

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 2. В качестве источника радиосигнала использован генератор стандартных сигналов типа MXG N5183A от фирмы Agilent. В качестве индикатора выходного сигнала использован осциллограф типа DSO9254A. Источником питания служил прибор GPC-73060D.



Рис. 2. Структурная схема измерительной установки

В первом эксперименте на вход приёмника сигнал не подавался, поэтому на рис. 3 изображён только шум на выходе логарифмического приёмника.

Во втором эксперименте на вход приёмника был подан радиоимпульсный сигнал мощностью минус 55 дБм. На рис. 4 показана смесь сигнала и шума, а также гистограмма смеси сигнала и шума.

В третьем эксперименте на вход приёмника был подан радиоимпульсный сигнал мощностью минус 45 дБм, длительностью 3,9 мкс с периодом повторения 8 мкс. На рис. 5 можно видеть смесь сигнала и шума, а также гистограмму смеси сигнала и шума.

В четвёртом эксперименте на вход приёмника был подан радиоимпульсный сигнал мощностью минус 35 дБм. На рис. 6 наблюдаем смесь смеси сигнала и шума, а также гистограмму смеси сигнала и шума.

В пятом эксперименте на вход приёмника был подан радиоимпульсный сигнал мощностью минус 25 дБм. На рис. 7 видна смесь сигнала и шума, а также гистограмма смеси сигнала и шума.

В нижней части рис. 3–7 в табличной форме приведён набор параметров: среднее, среднеквадратическое значение, мода, медиана. Из этих рисунков они сведены в табл. 1. По данным табл. 1 построены графики на рисунках 8 и 9 для среднего и среднеквадратического значений смеси сигнала и шума. Данные табл. 1 и графики на рис. 3–9 позволяют сформировать количественные и качественные выводы.

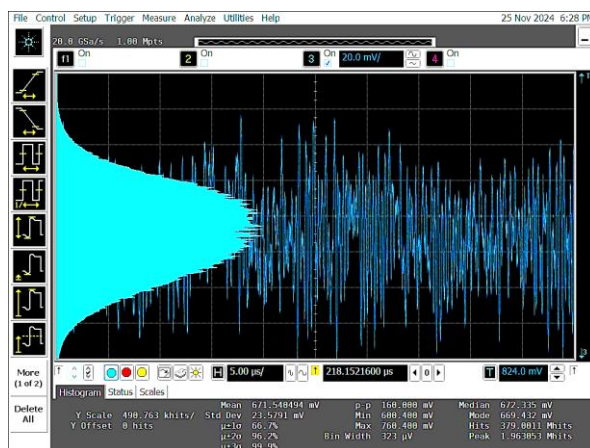


Рис. 3. Осциллограмма и гистограмма шума на выходе ЛУД

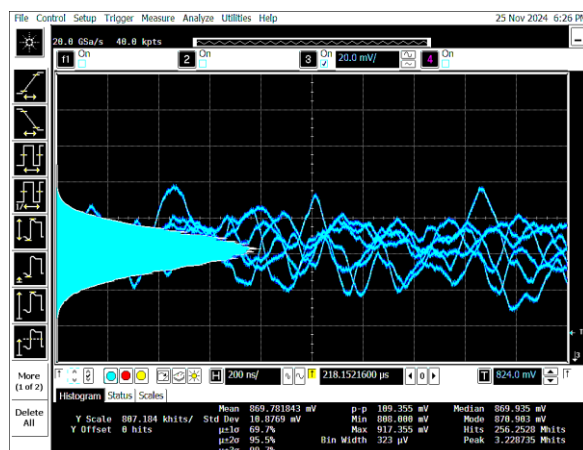


Рис. 4. Осциллограмма и гистограмма смеси сигнала шума на выходе ЛУД при $P_{вх} = -55$ дБм

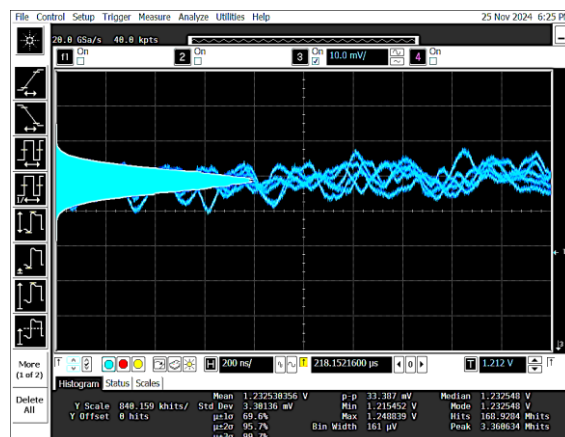


Рис. 5. Осциллограмма и гистограмма смеси сигнала шума на выходе ЛУД при $P_{ex} = -45$ дБм

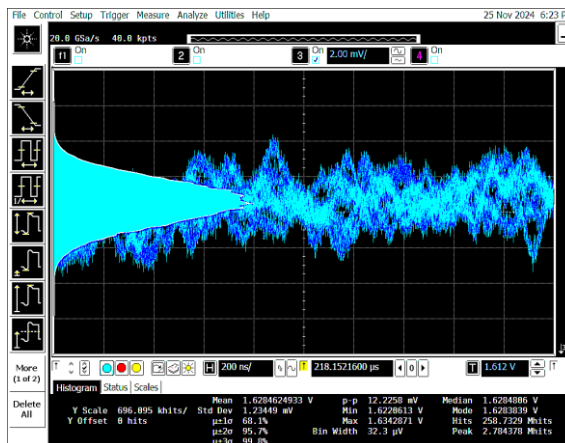


Рис. 6. Осциллограмма и гистограмма смеси сигнала шума на выходе ЛУД при $P_{ex} = -35$ дБм

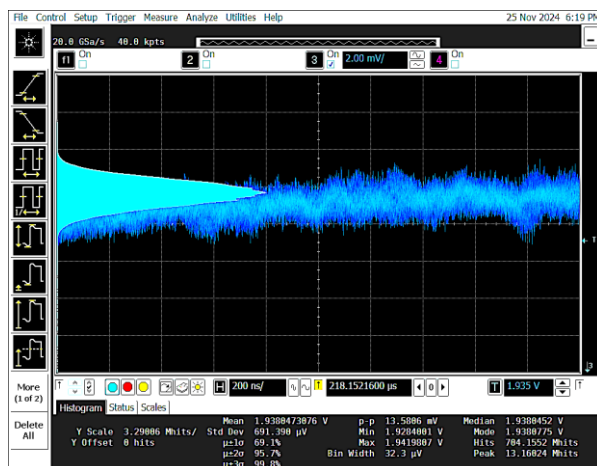


Рис. 7. Осциллограмма и гистограмма смеси сигнала шума на выходе ЛУД при $P_{ex} = -25$ дБм

Таблица 1

Основные параметры гистограмм

Входная мощность сигнала, дБм	СКО, мВ	Среднее, мВ	Мода, мВ	Медиана, мВ
-55	10,87	869	870	869
-50	5,14	-	-	-
-45	3,3	1232	1232	1232
-40	1,87	-	-	-
-35	1,23	1268	1628	1628
-30	0,635	-	-	-
-25	0,691	1938	1938	1938
-20	0,553	-	-	-
Только шум	23,57	671	669	672

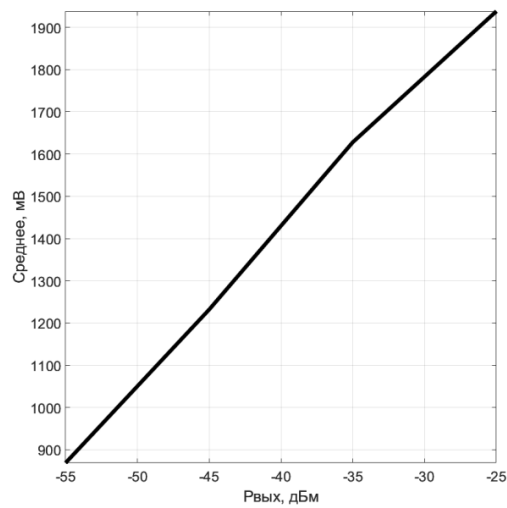


Рис. 8. Зависимость среднего на выходе ЛУД от мощности сигнала

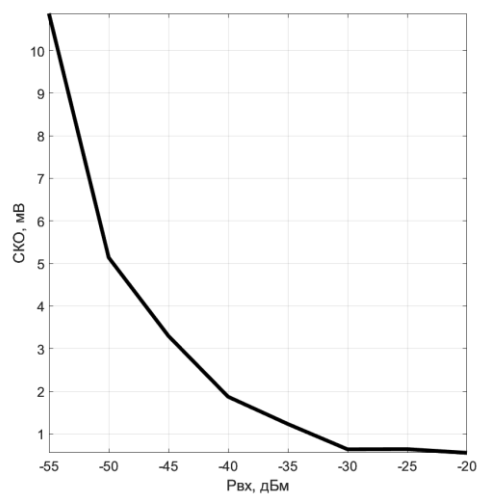


Рис. 9. Зависимость СКО смеси сигнала и шума от мощности сигнала

Кроме графического материала, полученного с помощью цифрового осциллографа, был снят массив данных в виде таблицы (X, Y). Каждая из 5 таблиц содержит несколько десятков тысяч строк. Обработка данных проводилась с помощью программы MATLAB [18]. В качестве результатов расчёта представлены параметры гистограмм в табл. 2.

Таблица 2

Параметры распределений

Коэффициент	Рис. 3 Рвх = 0 мВт	Рис. 4 Рвх = -55 дБм	Рис. 5 Рвх = -45 дБм	Рис. 6 Рвх = -35 дБм	Рис. 7 Рвх = -25 дБм
асимметрии	-0,0878	0,0659	-0,135	0,313	0,031
эксцесса	2,678	2,394	2,578	2,623	3,471

Из табл. 2 видно, что гистограмма имеет очень малый коэффициент асимметрии и является симметричной. Коэффициент эксцесса меняется от 2,394 до 3,471, т.е. колеблется около цифры 3, характерного для гауссовского закона распределения.

Значения среднего, СКО, коэффициента асимметрии и эксцесса позволяют представить распределение вероятностей смеси сигнала и шума в виде ряда Эджворта из четырёх членов [19, 20]:

$$F_1(c) = \int_{-\infty}^c dF_1(y) = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{y}{\sqrt{2}} \right) \right] - \frac{c \frac{y^2}{2}}{24\sqrt{2\pi}} \{4kH_2(y) + \gamma H_3(y)\},$$

где $y = (c - x_1)/\sqrt{x_2}$ – нормированный аргумент;

$k = \frac{x_3}{x_2^{3/2}}$ – коэффициент асимметрии;

$\gamma = \frac{x_4}{x_2^2}$ – коэффициент эксцесса;

x_1, x_2, x_3, x_4 – кумулянты;

$\Phi(x)$ интеграл вероятности $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$;

$H_2(y), H_3(y)$ – полиномы Эрмита.

Выводы:

1. Совпадение численных значений среднего, моды и медианы свидетельствует о принадлежности плотности распределения смеси сигнала и шума на выходе ЛУД к классу симметричных, у которых коэффициент асимметрии равен нулю.
2. Смесь сигнала и шума на выходе ЛУД в первом приближении можно описать гауссовым законом, с параметрами среднего и СКО, указанными в табл. 1 и на рис. 8 и 9.
3. Второе приближение для закона распределения ЛУД представлено в виде ряда Эджворта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Функциональные усилители с большим динамическим диапазоном. Основы теории и практики / под ред. В.М. Волкова. – М.: Сов. радио, 1976. – 394 с.
2. Крылов Г.М., Какунин А.С., Панов В.И. Расчёт логарифмических усилителей с нелинейными элементами в цепях нагрузки. – М.: Энергия, 1969. – 104 с.
3. Крылов Г.М., Вишневская А.В. Проектирование логарифмических усилителей с непрерывным детектированием сигнала. – М.: Энергия, 1970. – 144 с.
4. Евсиков Ю.А., Чапурский В.В. Преобразование случайных процессов в радиотехнических устройствах: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1977. – 264 с.
5. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Детектирование радиосигналов в телекоммуникационных системах: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – 173 с.
6. Гилберт Б. Коэффициент шума и логарифмические усилители // Компоненты и технологии. – 2008. – № 10. – С. 23-26.
7. Беляев Д.В., Зикий А.Н., Бурлаченко А.А. Искажение формы импульсов в логарифмическом приёмнике // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия ОВР. – 2008. – № 1.

8. Михалев П. Микросхемы логарифмических усилителей традиционной схемотехники // Компоненты и технологии. – 2017. – № 8. – С. 51-58.
9. Михалев П. Микросхемы современных логарифмических усилителей для радиочастотных приложений // Компоненты и технологии. – 2008. – № 10. – С. 23-26.
10. Михалев П. Обзор основных схем логарифмических усилителей для радиочастотных приложений производства фирмы Analog Devices // Компоненты и технологии. – 2008. – № 11. – С. 43-52.
11. Самков И. Основы теории демодулирующих логарифмических усилителей // Электронные компоненты. – 2009. – № 3. – С. 84-90.
12. Беляев Д.В., Зикий А.Н., Пономаренко А.А. Динамический диапазон приёмника прямого усиления с логарифмическим видеоусилителем // Матер. МНТК «Информационный подход в естественных, гуманитарных и технических науках». Ч. 4. – Таганрог, ТРТУ, 2004. – С. 8-9.
13. Беляев Д.В., Зикий А.Н., Помазанов А.В. Динамический диапазон и пропускная способность приёмника прямого усиления с логарифмическим видеоусилителем // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия ОВР. – 2004. – № 2. – С. 188-122.
14. Беляев Д.В., Зикий А.Н., Румянцев К.Е. Аппроксимация амплитудной характеристики детекторного приёмника // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2005. – № 6. – С. 201-205.
15. Кен Янг. Логарифмические усилители для комплексных измерений РЧ-сигналов // Электронные компоненты. – 2006. – № 8. – С. 121-124.
16. Беляев Д.В., Бураченко А.А., Зикий А.Н., Румянцев К.Е. Логарифмические детекторы (обзор) // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2008. – № 12, Часть 2. – С. 241-249.
17. Андрианов А.В., Бабаев А.А., Зикий А.Н., Пустовалов А.И. Экспериментальное исследование пеленгационного приёмника сантиметрового диапазона // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 5. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6987.
18. Дьяконов В.П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров. – М.: ДМК – Пресс, 2016. – 976 с.
19. Лихарев В.А. Цифровые методы и устройства в радиолокации. – М.: Сов. радио, 1973. – 456 с.
20. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1967. – 780 с.

REFERENCES

1. Funktsional'nye usiliteli s bol'shim dinamicheskim diapazonom. Osnovy teorii i praktiki [Functional amplifiers with a large dynamic range. Fundamentals of theory and practice], ed. by V.M. Volkova. Moscow: Sov. radio, 1976, 394 p.
2. Krylov G.M., Kakunin A.S., Panov V.I. Raschet logarifmicheskikh usiliteley s nelineynymi elementami v tsepyakh nagruzki [Calculation of logarithmic amplifiers with nonlinear elements in load circuits]. Moscow: Energiya, 1969, 104 p.
3. Krylov G.M., Vishnevskaya A.V. Proektirovanie logarifmicheskikh usiliteley s nepreryvnym detektirovaniem signala [Design of logarithmic amplifiers with continuous signal detection]. Moscow: Energiya, 1970, 144 p.
4. Evsikov Yu.A., Chapurskiy V.V. Preobrazovanie sluchaynykh protsessov v radiotekhnicheskikh ustroystvakh: ucheb. posobie [Transformation of random processes in radio engineering devices: a tutorial]. Moscow: Vysshaya shkola, 1977, 264 p.
5. Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Detektirovanie radiosignalov v telekommunikatsionnykh sistemakh: ucheb. posobie [Detection of radio signals in telecommunication systems: a tutorial]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, 173 p.
6. Gilbert B. Koeffitsient shuma i logarifmicheskie usiliteli [Noise figure and logarithmic amplifiers], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2008, No. 10, pp. 23-26.
7. Belyaev D.V., Zikiy A.N., Burlachenko A.A. Iskazhenie formy impul'sov v logarifmicheskom priemnike [Pulse shape distortion in a logarithmic receiver], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya OVR* [Issues of special radio electronics. Series OVR], 2008, No. 1.
8. Mikhalev P. Mikroskhemy logarifmicheskikh usiliteley traditsionnoy skhemotekhniki [Microcircuits of logarithmic amplifiers of traditional circuitry], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2017, No. 8, pp. 51-58.
9. Mikhalev P. Mikroskhemy sovremennykh logarifmicheskikh usiliteley dlya radiochastotnykh prilozheniy [Microcircuits of modern logarithmic amplifiers for radio-frequency applications], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2008, No. 10, pp. 23-26.
10. Mikhalev P. Obzor osnovnykh skhem logarifmicheskikh usiliteley dlya radiochastotnykh prilozheniy proizvodstva firmy Analog Devices [Review of the main circuits of logarithmic amplifiers for radio-frequency applications manufactured by Analog Devices], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2008, No. 11, pp. 43-52.

11. Samkov I. Osnovy teorii demoduliruyushchikh logarifmicheskikh usiliteley [Fundamentals of the Theory of demodulating logarithmic amplifiers], *Elektronnye komponenty* [Electronic Components], 2009, No. 3, pp. 84-90.
12. Belyaev D.V., Zikiy A.N., Ponomarenko A.A. Dinamicheskiy diapazon priemnika pryamogo usileniya s logarifmicheskim videousilitelem [Dynamic range of a direct-amp receiver with a logarithmic video amplifier], *Mater. MNTK «Informatsionnyy podkhod v estestvennykh, gumanitarnykh i tekhnicheskikh naukakh»* [Proceedings of the Scientific and Technical Conference "Information Approach in Natural, Humanitarian and Technical Sciences"], Part 4. Taganrog, TRTU, 2004, pp. 8-9.
13. Belyaev D.V., Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Dinamicheskiy diapazon i propusknaya sposobnost' priemnika pryamogo usileniya s logarifmicheskim videousilitelem [Dynamic range and bandwidth of a direct gain receiver with a logarithmic video amplifier], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya OVR* [Issues of special radio electronics. Series OVR], 2004, No. 2, pp. 188-122.
14. Belyaev D.V., Zikiy A.N., Rumyantsev K.E. Approksimatsiya amplitudnoy kharakteristiki detektornogo priemnika [Approximation of the amplitude characteristic of a crystal receiver], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information counteraction to terrorist threats], 2005, No. 6, pp. 201-205.
15. Ken Yang. Logarifmicheskie usiliteli dlya kompleksnykh izmereniy RCh-signalov [Logarithmic amplifiers for complex measurements of RF signals], *Elektronnye komponenty* [Electronic Components], 2006, No. 8, pp. 121-124.
16. Belyaev D.V., Burlachenko A.A., Zikiy A.N., Rumyantsev K.E. Logarifmicheskie detektory (obzor) [Logarithmic detectors (review)], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information Counteraction to Terrorist Threats], 2008, No. 12, Part 2, pp. 241-249.
17. Andrianov A.V., Babaev A.A., Zikiy A.N., Pustovalov A.I. Eksperimental'noe issledovanie pelengatsionnogo priemnika santimetrovogo diapazona [Experimental study of a centimeter-range direction-finding receiver], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2021, No. 5. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6987.
18. D'yakonov V.P. MATLAB i Simulink dlya radioinzhenerov [MATLAB and Simulink for radio engineers]. Moscow: DMK – Press, 2016, 976 p.
19. Likharev V.A. Tsifrovye metody i ustroystva v radiolokatsii [Digital methods and devices in radar]. Moscow: Sov. radio, 1973, 456 p.
20. Andre Ango. Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov [Mathematics for electrical and radio engineers]. Moscow: Nauka, 1967, 780 p.

Андрианов Артур Валерьевич – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: artur_andrianov_1990@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79034885927; начальник отдела.

Зикий Анатолий Николаевич – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: zikiy50@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185822295; к.т.н.; с.н.с.

Кочубей Алексей Сергеевич – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: l.co4ubey@ya.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79896270939; инженер-конструктор II категории.

Andrianov Artur Valerievich – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: artur_andrianov_1990@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79034885927; head of department.

Zikiy Anatoly Nikolaevich – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185822295; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Kochubey Alexey Sergeevich – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: l.co4ubey@ya.ru; Taganrog, Russia; phone: +79896270939; design engineer category II.

УДК 621.396.67

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-255-262

Во Ба Ау, Ю.В. Юханов

НИЗКОПРОФИЛЬНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ

Рассмотрена конструкция низкопрофильной антенной решетки для базовой станции. Основной деталью конструкции является квадратный дипольный массив, который представляет собой утолщенные вибраторы. В конструкции применяется балун в форме «Змейки», который обеспечивает формирование линий передачи и поддержку излучателей с квадратным контуром.

Улучшение полосы рабочих частот и уменьшение высоты удалось достичь путем размещения непосредственно между диполем и землей диэлектрического материала с $\epsilon_r = 2$, $\tan(\delta) = 0.002$, электрическая толщина которого составила 0.16λ на центральной частоте рабочего диапазона длин волн. Представлены результаты численного исследования характеристик элементарной ячейки антенной решетки с периодическими граничными условиями на гранях в программном обеспечении ANSYS HFSS. Показаны коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) элементов антенны и элементов прототипа Kathrein 739622. Показана зависимость КСВН элемента антенны от частоты при различных значениях радиуса диполя. Исследовано влияние размера балуна на характеристики элемента антенной решетки. Расчетным путем установлено, что выбор радиуса диполя позволяет укоротить диполь в 1,5 раза и выбор размера балуна в форме «Змейки» обеспечивает уменьшение высоты антенны при этом не ухудшаются характеристики антенны. Показаны диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На основе предложенного элемента разработаны модели конечных антенных решеток. Эта антенна обычно состоит из ряда 4 идентичных элементов, установленных вдоль вертикальной линии, что формирует антенную решетку. Показаны КСВН и коэффициент усиления (КУ) антенной решетки и также диаграммы направленности антенной решетки в горизонтальной и вертикальной плоскости на разных частотах. Результаты моделирования показывают, что благодаря предложенной оригинальной идее трансформации прямолинейного балуна в криволинейный в форме «змейки» и утолщенных вибраторов удалось получить конструкцию излучателя базовой сотовой связи, уменьшенную в 1,5 раза по сравнению с применяемыми антеннами на практике в Kathrein 739622 с не худшими характеристиками.

Антенная решетка; дипольные антенны; поляризация; антенна для базовой станции.

Vo Ba Au, Y.V. Yukhanov

LOW-PROFILE ANTENNA ARRAY FOR A BASE STATION

The design of a low-profile antenna array for a base station is considered. The main part of the design is a square dipole array, which is thickened vibrators. The design uses a balun in the form of a snake, which provides the formation of transmission lines and support for radiators with a square contour. The improvement of the operating frequency band and the reduction of the height were achieved by placing a dielectric material with $\epsilon_r = 2$, $\tan(\delta) = 0.002$ directly between the dipole and the ground, the electrical thickness of which was 0.16λ at the central frequency of the operating wavelength range. The results of a numerical study of the characteristics of an elementary cell of an antenna array with periodic boundary conditions on the edges in the ANSYS HFSS software are presented. VSWR of antenna elements and prototype element Kathrein 739622 are shown. The dependence of VSWR of antenna element on frequency at different values of dipole radius is shown. The influence of balun size on characteristics of antenna array element is investigated. It was established by calculation that the choice of the dipole radius shortens the dipole by 1.5 times, and the choice of the size of the "Snake" shaped balun ensures a lower antenna height, without deteriorating the antenna's characteristics. Radiation patterns in horizontal and vertical planes are shown. Based on the proposed element, models of finite antenna arrays are developed. This antenna usually consists of a row of 4 identical elements installed along a vertical line to form an antenna array. VSWR and gain of antenna array and also radiation patterns in the horizontal and vertical planes at different frequencies are shown. The results show that due to the proposed original idea of transforming a rectilinear balun into a curvilinear one in the form of a "snake" and thickened vibrators, it was possible to obtain a design of a basic cellular communication emitter of 1.5 times smaller dimensions, compared to those antennas used in practice in Kathrein 739622 with good characteristics.

Antenna array; dipole antennas; polarization; antenna for base station.

Введение. С быстрым развитием технологий беспроводной связи неизбежна ситуация, при которой сосуществуют различные стандарты связи. С уменьшением ресурсов антенны базовых станций с широкополосной связью и двойной поляризацией стали предпочтительными в современных приложениях антенн базовых станций, поскольку они могут снизить стоимость установки, значительно улучшить емкость системы и качество сигнала [1–3]. Также достижение стабильных рабочих характеристик, несмотря на влияние ветра, дождя и других факторов, требует особого внимания к размерам и форме антенной системы. Необходимость создания низкопрофильной конструкции или уменьшения размеров антенны вызывает интерес и внимание при проектировании антенны для базовой станции БС [3].

Для решения этой проблемы было предложено несколько форм широкополосной антенны базовой станции [4–7]; однако либо антенны слишком высокие, либо дальнейшее уменьшение высоты этих антенн представляет собой сложную задачу.

Для базовых станций антенны с двойной поляризацией предложены в [9–11] с различными структурами. Например, патч-антенна с ортогональной линейной поляризацией была предложена в [10], рабочая полоса частот предлагаемой антенны не слишком широка от 890 до 960 МГц, чтобы охватить диапазоны CDMA800 и GSM900. В [11] магнитоэлектрическая дипольная антенна представляет собой сложные структуры, что ограничивает широкое применение антенн.

В данной статье представлен широкополосный наклонный $\pm 45^\circ$ двойной поляризованный антенный элемент базовой станции, работающий в диапазоне частот 790–960 МГц. Элемент антенны имеет хорошие электрические характеристики, включая КСВН $< 1,5$ и стабильную диаграмму направленности как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Кроме того, элемент антенны имеет отличные механические свойства, такие как компактная структура, высокая надежность, хорошая стабильность, малый вес и простота изготовления. На основе элемента представлена антенная решетка в виде 4 идентичных элементов, установленных вертикально.

Конструкция элемента антенной решетки. На рис. 1 показан общий вид предлагаемого широкополосного двойного поляризованного антенного элемента состоит из квадратного дипольного массива, балуна в форме «Змейки» и U-образного металлического отражателя. На рис. 1,а–в представлены полный вид, вид сверху и вид сбоку предлагаемого излучающего элемента соответственно.

Конструкция элемента включает излучатель, который состоит из двух пар симметричных диполей, четыре пар симметризирующих трансформаторов и металлический отражатель.

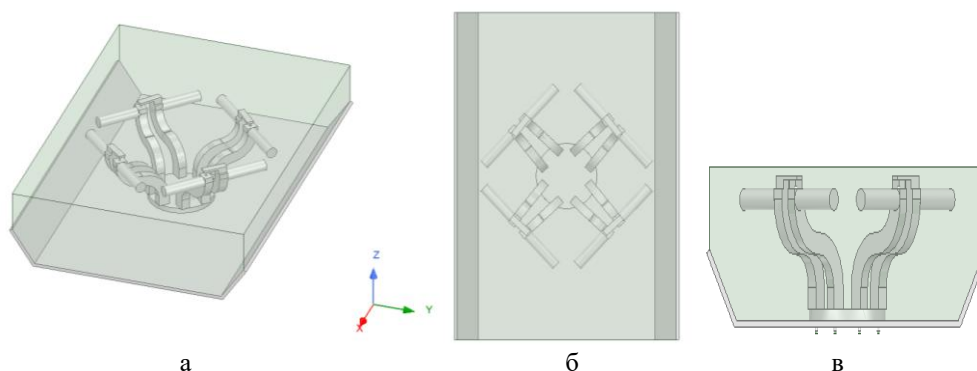


Рис. 1. (а) конфигурация исследованного антенного элемента базовой станции, (б) вид сверху и (в) вид сбоку

Излучающие токи в диполях на противоположных сторонах квадрата синфазны. Одна пара диполей обеспечивает поляризацию $+45^\circ$, а другая -45° поэтому это называется наклонной $\pm 45^\circ$ двойной поляризацией. Длина диполя напрямую определяет резонансную частоту антенны. Расстояние между двумя соседними излучателями заметно влияет на согласование импеданса антенны.

В конструкции предложен балун в форме «Змейки», который обеспечивает преобразование линии передачи, например, коаксиального кабеля 50 Ом, в структуру сбалансированного питания и одновременно поддерживает излучатели с квадратным контуром. Коаксиальные кабели проходят через кабельные трассы и питают диполи: внешний проводник коаксиального кабеля подключается к одному плечу пары симметричных диполей, а внутренняя жила подключается к другому плечу диполей. Форма и размер балуна оказывают значительное влияние на характеристики антенны.

Отражатель также сильно влияет на характеристики излучения антенны. При правильной конструкции отражателя можно получить хороший баланс между шириной луча главного лепестка, отношением переднего к заднему лепестку.

Улучшение полосы рабочих частот и уменьшение высоты и габаритов элемента антенны удалось достичь путем размещения непосредственно между диполями и землей диэлектрического материала с $\epsilon_r = 2$, $\tan(\delta) = 0.002$, электрическая толщина которого составила $0,16\lambda$ на центральной частоте рабочего диапазона длин волн.

В качестве прототипа использована антенна для базовой станции модели Kathrein 739622. (рис. 2).

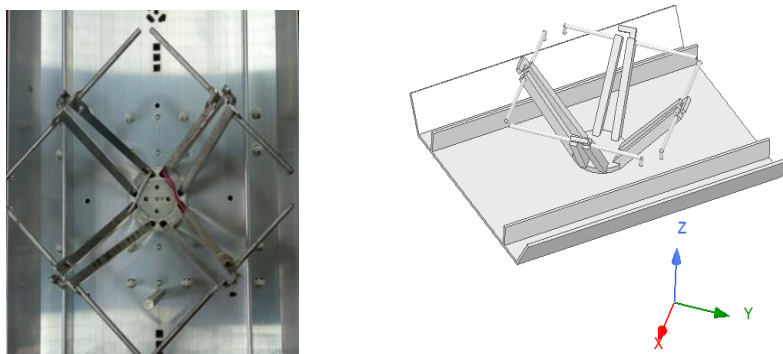


Рис. 2. Модель и прототипа элемента антенны Kathrein 739622

В основном конструкция предлагаемого элемента и прототипа антенны Kathrein 739622 схожа. Отличие заключается в радиусе диполя и форме балуна. Длина диполя у элемента Kathrein 739622 больше 1,5 раза, чем у предлагаемого. В конце каждого диполя прототипа имеется изогнутая часть для удобного размещения элемента антенны в корпусе.

Результаты численного исследования элемента низкопрофильной антенной решетки для базовой станции. Модель антенны была исследована с помощью программы HFSS. Проведено сравнение с характеристиками прототипа антенны Kathrein 739622. Параметры КСВН показаны на рис. 3.

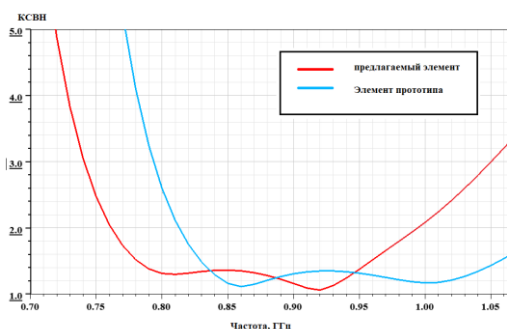


Рис. 3. КСВН элемента антенны

Результаты расчетов показали, что по критерию $КСВН < 1,5$ можно добиться рабочей полосы частот 0,78–0,96 ГГц, которая охватывает как полосы частот CDMA, так и мобильной связи GSM. По сравнению с элементом прототипа рабочие полосы смещаются в более низкие частоты, однако технические требования антенны выполняются.

На рис. 4 показана зависимость КСВН от частоты для различных значений радиуса диполя. Изменение КСВН является сильно выраженным, путём увеличения радиуса диполя можно добиться расширения полосы рабочих частот по критерию $КСВН < 1,5$ в области низких частот рабочего диапазона, и одновременно уменьшения длины диполя на 1,5 раза.

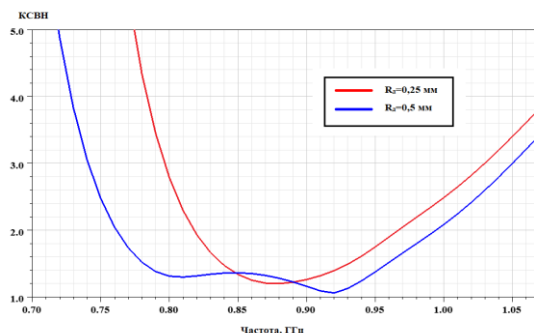


Рис. 4. Зависимость КСВН элемента антенны от частоты при различных значениях радиуса диполи

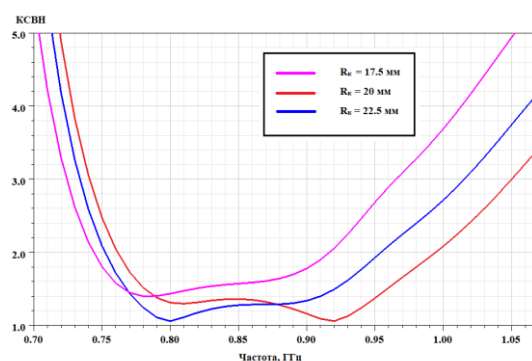


Рис. 5. Влияние размера балуна на характеристики элемента антенной решетки.
Зависимость КСВН элемента АР от частоты

На рис. 5 показаны зависимости КСВН от частоты при различных значениях радиуса дуги балуна R_k в форме «Змейки» предлагаемого элемента антенны. Из анализа результатов можно сделать вывод, что при оптимальном выборе радиуса дуги балуна обеспечивается КСВН $< 1,5$ в области рабочих частот 0,78-0,96 ГГц. При увеличении радиуса дуга обеспечивает лучшее согласование на низких частотах диапазона рабочих длин волн. Но в то же время это приводит к увеличению коэффициента стоячей волны в области верхних частот. При уменьшении радиуса дуга происходит рассогласование на всем диапазоне частот. Таким образом размер балуна оказывает значительное влияние на характеристики антенны.

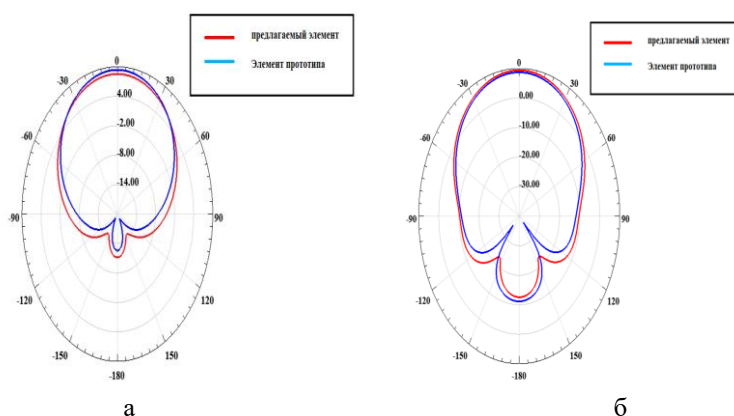


Рис. 6. Диаграммы направленности элемента антенны в (а) горизонтальной и (б) вертикальной плоскости на 0,88 ГГц частоте

Диаграммы направленности элемента на частоте 0,88 ГГц в пределах рабочей полосы имеют ширину луча 3дБ более 65° по горизонтали. Видно, что у предлагаемого элемента наблюдается более низкий уровень излучения заднего лепестка в вертикальной плоскости.

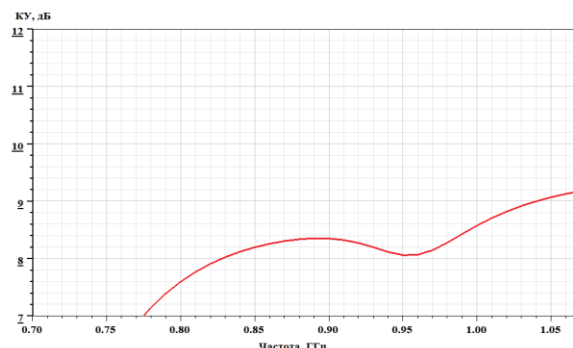


Рис. 7. Коэффициент усиления предлагаемого элемента антенны

На рис. 7 показан реализованный коэффициент усиления элемента предлагаемой антенной решетки, который достигает 9,5 дБ в области частот диапазона. Пиковое усиление составляет 8,4 дБ на частоте 0,9 ГГц и варьируется менее 0,4 дБ во всем рабочем диапазоне 0,78–0,96 ГГц.

Конструкция низкопрофильной антенной решетки для базовой станции. На рис. 8 представлена конструкция антенной решетки для базовой станции на основе предлагаемого элемента. Эта антенна состоит из ряда 4 идентичных элементов, установленных вдоль вертикальной линии, что формирует антенную решетку. Эти элементы расположены на расстоянии в одну длину волны с соответствующими элементами и возбуждаются токами соответствующей амплитуды и фазы, которые определяют форму диаграммы направленности в вертикальной плоскости.

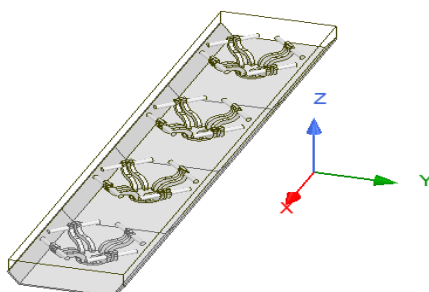


Рис. 8. Геометрия низкопрофильной антенной решетки для базовой станции

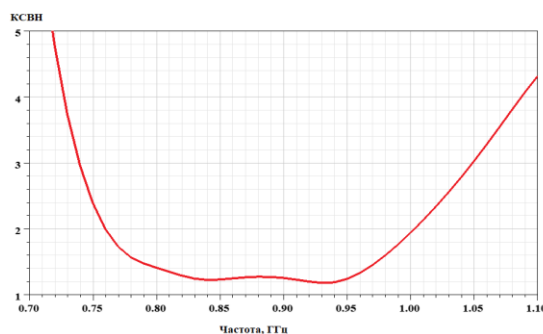


Рис. 9. КСВН низкопрофильной антенной решетки

Рассчитанные значения КСВН показаны на рис. 9. Как и КСВН элемента, КСВН антенной решеткой достигает значения менее 1,5 дБ в диапазоне рабочих частот 0,79–0,97 ГГц. Это соответствует требованиям технических задач по диапазону частот.

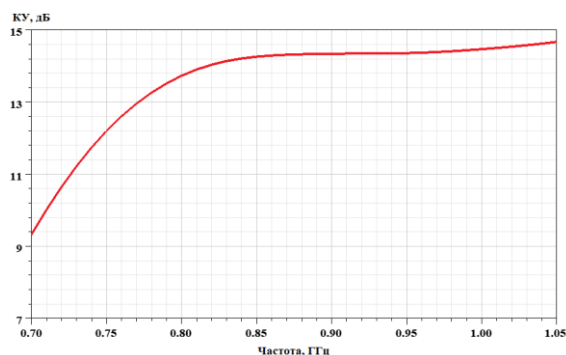


Рис. 10. Коэффициент усиления низкопрофильной антенной решетки

На рис. 10 показано что, коэффициент усиления антенной решетки составляет 14,5 дБ и так же мало варьируется в диапазоне рабочих частот от 0,78 до 0,96 ГГц. Данная антенная решетка обеспечивает стабильное усиление во всем диапазоне частот.

Диаграммы направленности в двух плоскостях показаны на рис. 11. Видно, что диаграммы направленности излучения стабильны на всей рабочей частот и улучшаются с увеличением частот в вертикальной частоте.

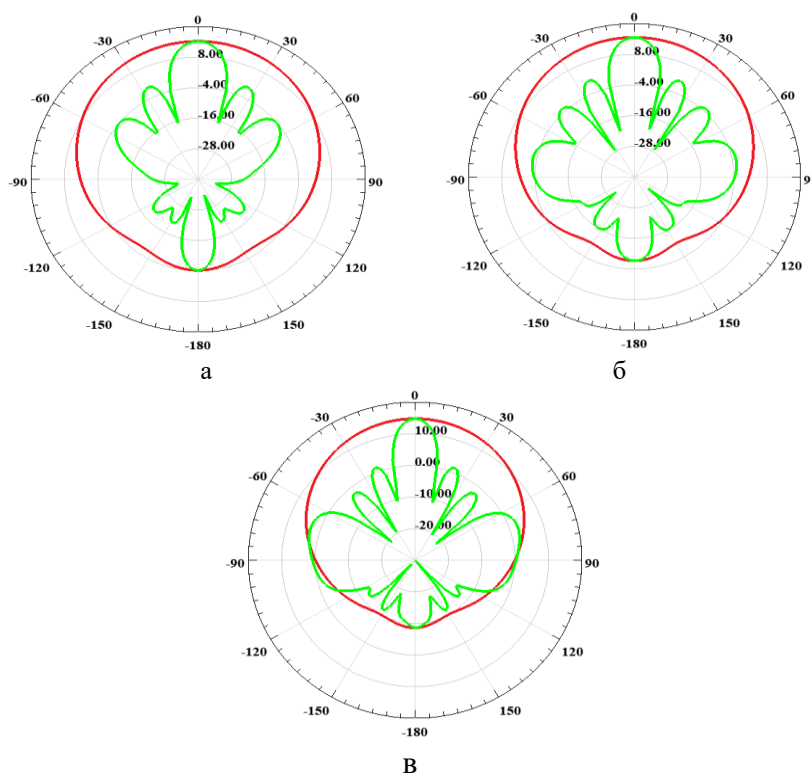


Рис. 11. Диаграммы направленности антенной решетки в горизонтальной и вертикальной плоскости на (а) 0,8 ГГц (б) 0,88 ГГц (в) 0,96 ГГц частоте

Заключение. В работе предложена антенная решетка для базовой станции с двойной наклонной поляризацией. Результаты измерений демонстрируют значение коэффициента стоячей волны по напряжению соотношение менее 1,5 дБ в диапазоне от 0,8 до 0,96 ГГц, которое охватывает как CDMA, так и полосы частот мобильной связи GSM. В пределах этой частоты диапазон, она имеет ширину луча 3дБ более 65° по горизонтали, и также обеспечивает низкий уровень излучения заднего лепестка в обеих плоскостях. Кроме того, антенная решетка имеет более низкопрофильную конструкцию по сравнению с существующими антеннами. Результаты моделирования доказали, что его основные технические характеристики полностью соответствуют промышленным стандартам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Daniel M. Telecommunications Technology Handbook. Boston, MA: Artech House, 2003.
2. Golio M. The RF and Microwave Handbook, Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.
3. Balanis C.A. Antenna Theory Analysis and Design, Hoboken, NJ, USA Wiley, 2005.
4. Targonski S.D., Waterhouse R.B. and Pozar D.M. Design of wide-band aperture-stacked patch microstrip antennas, *IEEE Transactions Antennas Propagation*, Sep. 1998, Vol. 46, No. 9, pp. 1245-1251.
5. Lai H.W. and Luk K.M. Design and study of wide-band patch antenna fed by meandering probe, *IEEE Transactions Antennas Propagation*, Feb. 2006, Vol. 54, No. 2, pp. 564-571.
6. Wong H., Lau K.L. and Luk K.M. Design of dual-polarized L-Probe patch antenna arrays with high isolation, *IEEE Trans Antennas Propagation*, Jan. 2004, Vol. 52, No. 1, pp. 45-52.
7. Gao S., Li L.W., Leong M.S. and Yeo T.S. A broad-band dual-polarized microstrip patch antenna with aperture coupling, *IEEE Transactions Antennas Propagation*, Apr. 2003, Vol. 51, No. 4, pp. 898-900.
8. Sim C., Chang C. and Row J. Dual-feed dual-polarized patch antenna with low cross polarization and high isolation, *IEEE Transactions Antennas Propagation*, Oct. 2009, Vol. 57, No. 10, pp. 3321-3324.
9. Luk K.M., Lai C.H. and Lee K.F. Wideband L-probe-feed patch antenna with dual-band operation for GSM/PCS base stations, *Electronics Letters*, Jul. 1999, Vol. 35, No. 14, pp. 1123-1124.
10. Chiou T.W. and Wong K.L. A compact dual-band dual-polarized patch antenna for 900/1800-MHz cellular systems, *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, Aug. 2003, Vol. 51, No. 8, pp. 1936-1940.
11. Wenxing An, Shufang Li, Weijun Hong, Fangzheng Han and Kunpeng Chen. Design of wideband dual-band dual-polarized dipole for base station antenna, *Journal of China Universities of Posts & Telecommunications*, Jun. 2012, Vol. 19, No. 19, pp. 22-28.
12. Kaboli M., Abrishamian M.S., Mirtaheeri S.A. and Aboutorab S.M. High-isolation XX-polar antenna, *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, Jul. 2012, Vol. 60, No. 9, pp. 4046-4055.
13. Shaoli Zuo, Qiongqiong Liu and Zhiya Zhang. Wideband dual-polarized crossed-dipole antenna with parasitical crossed-strip for base station applications, *Progress in Electromagnetics Research C*, Jan. 2014, Vol. 48, pp. 159-166.
14. Yanyan Liu and Zhihong Tu. Differential enhanced broadband dual-polarized printed dipole antenna for base stations, *Microwave & Optical Technology Letters*, Dec. 2016, Vol. 58, No. 12, pp. 2864-2868.
15. Yejun He, Yadong Yue and Zhongxiang Shen. A novel broadband dual-polarized antenna element for LTE700 MHz/GSM850 MHz/GSM900 MHz applications, *IEEE Access*, 2016, Vol. 4, pp. 4321-4326.
16. Siwiak K. and McKeown D. Ultra-wideband Radio Technology. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
17. Ghavami M., Michael L.B., and Kohno R. Ultra-wideband Signals and Systems in Communication Engineering. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
18. Liu Z., Liu J., Liu Z., Zhang Y. and Zhang X.-Y. A novel dual-band and high-gain antenna for 2G/3G base station, *Progress in Electromagnetics Research Letters*, Jun. 2015, Vol. 54, pp. 1-6.
19. Guanfeng Cui, Shigang Zhou, Shuxi Gong and Ying Liu. A compact dual-polarized antenna for base station application, *Progress in Electromagnetics Research Letters*, Jan. 2016, Vol. 59, pp. 7-13.
20. Chen S. and Luk K.M. High performance dual-band dual-polarized magneto-electric dipole base station antenna, *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. (APMC)*, Nov. 2014, pp. 321-323.

Во Ба Ау – Южный федеральный университет; e-mail: bvo@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371634; слушатель.

Юханов Юрий Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: yu_yukhanov@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

Vo Ba Au – Southern Federal University; e-mail: bvo@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371634; listener.

Yukhanov Yury Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: yu_yukhanov@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371634; the Department Antenna and Radio Transmitter; dr. of eng. sc.; professor; head of the department.

Д.И. Бакшун, С.П. Тарасов, И.И. Турулин

**МЕТОДИКА РЕАЛИЗАЦИИ НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ УПРАВЛЯЕМОГО РЕКУРСИВНОГО ФИЛЬТРА
С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ НА ПРИМЕРЕ
АППРОКСИМАЦИИ ОКНА ХАННА**

Рассмотрена методика реализации рекурсивного фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) в виде окна Ханна с возможностью управления длительностью (в отсчетах или тактах) КИХ, в том числе в процессе фильтрации, на основе одновременной последовательной компенсации отсчетов из рекурсивной части. Выполнен краткий обзор существующего решения для управления длительностью прямоугольной импульсной характеристики и предложены способы реализации импульсных характеристик более сложной формы на примере окна Ханна. Предложенный авторами метод позволяет добиться устойчивости фильтра при изменении длительности импульсной характеристики во времени. Разработана структура модуля для реализации фильтра на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Рассмотренная в статье, структура рекурсивного фильтра имеет существенно меньшую вычислительную сложность по сравнению с классической структурой КИХ-фильтра, и применять её можно во встраиваемых системах с ограниченными вычислительными ресурсами. Меньшая вычислительная сложность достигается за счет применения в качестве КИХ функцию, аппроксимирующую окно Ханна, которая представляет собой полином третьей степени. Фильтрация выполняется за счет двух независимых фильтров, один из которых настроен на длительность КИХ до ее изменения, а другой – после с последующим суммированием результата. Такой подход базируется на принципе линейности системы, который позволяет комбинировать выходные сигналы фильтров без потери их свойств. Управление длительностью задержки выполняется на основе возможности двухпортовой RAM-памяти одновременно производить запись и чтение. При изменении длительности КИХ вычисление коэффициентов фильтра выполняется во время фильтрации, за счет чего устраняются обрывы между участками выходного сигнала до и после изменения длительности КИХ. Предусмотрена защита от ввода нового параметра длительности КИХ до завершения компенсации переходного процесса вследствие предыдущего изменения длительности КИХ. После завершения процедуры компенсации фильтр, настроенный на длительность КИХ до ее изменения, прекращает свою работу.

Рекурсивный; ПЛИС; КИХ-фильтр; окно Ханна; конечная импульсная характеристика; КИХ; устойчивость; управляемый; компенсация.

D.I. Bakshun, S.P. Tarasov, I.I. Turulin

**METHODOLOGY OF REALIZATION ON PLIS OF A CONTROLLED RECURSIVE
FILTER WITH A FINITE IMPULSE RESPONSE IN THE FORM
OF AN APPROXIMATION OF THE HANN WINDOW**

The paper considers the methodology of realization of recursive filter with finite impulse response (FIR) in the form of Hahn window with the possibility of controlling the duration (in counts or cycles) of FIR, including in the process of filtering, based on simultaneous sequential compensation of samples from the recursive part. A brief review of the existing solution for controlling the duration of a rectangular pulse characteristic is performed and the methods of realization of impulse response of more complex shape on the example of a Hahn window are proposed. The method proposed by the authors allows to achieve stability of the filter when the duration of the impulse characteristic changes in time. The structure of the module for realization of the filter on the basis of Field-Programmable Gate Array (FPGA) is developed. The recursive filter structure considered in this paper has significantly lower computational complexity compared to the classical FIR filter structure, and it can be used in embedded systems with limited computational resources. The lower computational complexity is achieved by using the function approximating the Hahn window, which is a third-degree polynomial, as the FIR. Filtering is accomplished by using two independent filters, one tuned to the duration of the FIR before its change and the other tuned to the duration of the FIR afterwards with the result summarized. This approach is based on the principle of linearity of the system, which allows combining the output signals of the filters without losing their properties. The control of the delay duration is performed based on the ability of the dual-ported RAM memory to simultaneously write and read. When changing the FIR duration, the calculation

of filter coefficients is performed during filtering, thus eliminating interruptions between the output signal sections before and after changing the FIR duration. There is a protection against entering a new parameter of the FIR duration before the transient compensation due to the previous change of the FIR duration is completed. After the compensation procedure is completed, the filter tuned to the FIR duration before it was changed is terminated.

Recursive; FPGA; FIR-filter; Hahn window; finite impulse response; FIR; stability; controlled; compensation.

Введение. Фильтрация сигналов является одной из самых востребованных задач в области цифровой обработки сигналов, где решения проблем снижения вычислительной сложности и повышению быстродействия являются актуальными.

Для минимизации затрат на выполнение базовых математических операций, таких как сложение и умножение, широко применяются рекурсивные фильтры. Эти фильтры отличаются низким порядком при сохранении требуемой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и обычно обладают бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) [1–4]. Однако существуют и рекурсивные фильтры с конечной импульсной характеристикой (РКИХ) [5–7], которые используют целочисленные коэффициенты или коэффициенты с фиксированной точкой. РКИХ-фильтры, в отличие от рекурсивных БИХ-фильтров, в случае симметрии импульсной характеристики (ИХ) имеют строго линейную фазочастотную характеристику (ФЧХ).

В статье предлагается методика проектирования РКИХ-фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) в виде степенной аппроксимации окна Ханна с возможностью регулировки частоты среза АЧХ фильтра в реальном времени за счет изменения длительности импульсной характеристики (ИХ). Такие фильтры могут применяться в областях техники, где требуемые параметры фильтрации непостоянны, например, в технологии цифрового радиоприёма (SDR – Software-defined radio).

Обзор существующих решений. В [8] предложен подход к описанию цифровых БИХ-фильтров через пространство состояний, основанный на частотных преобразованиях АЧХ. В [9] предложен метод проектирования настраиваемого режекторного БИХ-фильтра с низкой вычислительной сложностью. Метод основан на каскадном соединении фильтра нижних частот и режекторного фильтра. Также существует методика реализации управляемого фильтра с аналогичной формой АЧХ при линейной ФЧХ, в [10] где обеспечение перестройки в процессе работы основано на компенсации суммы в интеграторе, накопленной до изменения длительности ИХ, за счет дополнительной рекурсивной цепи. В статье предложена методика реализации управляемого РКИХ-фильтра с использованием двухпортовой RAM-памяти, которая применима и для других типов ИХ. Однако при использовании данной методики возникает проблема сохранения устойчивости при введении алгоритма управления для фильтра с ИХ в виде окна Ханна [11–16] из-за зависимости значений коэффициентов фильтра от длительности ИХ, в то время как для прямоугольной ИХ коэффициенты постоянны и равны единице. Сложность заключается в том, что сумма, накопленная в интеграторах, получена путем математических операций с задержанными отсчетами входного сигнала и значениями коэффициентов до изменения длительности ИХ, а компенсация – после. В таком случае, сумма, накопленная в интеграторах, не может компенсироваться, что приведет к потере устойчивости РКИХ-фильтра (после прекращения входного воздействия фильтр не вернется в исходное состояние). Для сохранения устойчивости после изменения длительности ИХ необходимо использовать в нерекурсивной компенсирующей части значения коэффициентов до изменения длительности. Также возможна ситуация, когда длительность (здесь и далее имеется в виду длительность в отсчетах или тактах) ИХ изменится до того, как скомпенсируется сумма в интеграторе после предыдущего изменения. Эти проблемы решаются параллельным включением двух РКИХ-фильтров, коэффициенты нерекурсивной части которых вычисляются для нового и предыдущего значения длительности ИХ.

Математическая модель. В работах [11–16] был рассмотрен РКИХ-фильтр с ИХ в виде окна Ханна без возможности регулировки частоты среза АЧХ, алгоритм нерекурсивной части которого (для нечетного значения длительности ИХ) можно описать как:

$$y_i = (L - 1)(x_i + x_{i-2L-1}) - (L + 1)(x_{i-1} + x_{i-2L}) + 2(x_{i-L} + x_{i-L-1}), \quad \#(1)$$

где x_{i-1} – входной дискретный сигнал; y_i – выходной дискретный сигнал; L – длительностью ИХ.

Данные коэффициенты формируются нахождении конечной разности [17] четвертого порядка от аппроксимирующего полинома окна Ханна третьей степени.

Для простоты здесь и далее будем рассматривать только нерекурсивную часть фильтров, так как именно в ней присутствуют коэффициенты, которые зависят от параметра L . Для такой структуры фильтра характерно постоянное число блоков задержки в нерекурсивной части, которое зависит от L . Управление длительностью ИХ подразумевает, что L зависит от дискретного времени.

Для описания алгоритма работы структуры нерекурсивной части управляемого фильтра введем несколько дополнительных сигналов: $sw_i, L0_i, L1_i, c_i$.

Сигнал переключения демультиплексора. Сигнал может принимать значение ноль или единица и переключать вход демультиплексора на соответствующий выход.

$$sw_i = \begin{cases} \overline{sw_{i-1}}, & \text{при } (L0_{i-1} \neq L1_{i-1}) \wedge (c_{i-1} < stop) \\ sw_{i-1}, & \text{иначе} \end{cases}. \quad \#(2)$$

Буфер задержки $b0_{i,j}$ первого канала фильтра и $b1_{i,j}$ второго канала. При изменении сигнала sw_i идет переключение входа демультиплексора на канал фильтра, для которого все значения ячеек памяти в буфере задержки равны ноль. При этом на вход другого блока задержки поступает ноль, тем самым перезаписывая отсчеты через интервал времени после того, как они считаются из памяти. Буфер задержки становится свободным (все ячейки памяти имеют значение 0), когда после изменения сигнала sw_i прошло количество тактов, равное значению параметра $stop$.

$$b0_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{при } (j = 0) \wedge (sw_i \neq 0) \\ x_{i-1}, & \text{при } (j = 0) \wedge (sw_i = 0) \\ b0_{i-1,j-1}, & \text{при } (j > 0) \end{cases} \quad \#(3)$$

$$b1_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{при } (j = 0) \wedge (sw_i = 0) \\ x_{i-1}, & \text{при } (j = 0) \wedge (sw_i \neq 0) \\ b1_{i-1,j-1}, & \text{при } (j > 0) \end{cases} \quad \#(4)$$

Задержки значения сигнала L_i . Пока предыдущие отсчеты сигнала x_i в линиях задержки фильтра не скомпенсированы, $L0_i$ и $L1_i$ не меняют своего предыдущего значения.

$$L0_i = \begin{cases} L_i, & \text{при } (L0_{i-1} = L1_{i-1}) \vee (c_{i-1} = stop) \\ L0_{i-1}, & \text{иначе} \end{cases} \quad \#(5)$$

$$L1_i = \begin{cases} L0_{i-1}, & \text{при } (L0_{i-1} = L1_{i-1}) \vee (c_{i-1} = stop) \\ L1_{i-1}, & \text{иначе} \end{cases} \quad \#(6)$$

$$L2_i = \begin{cases} L0_i, & sw_i = 0 \\ L1_i, & \text{иначе} \end{cases} \quad \#(7)$$

$$L3_i = \begin{cases} L0_i, & sw_i \neq 0 \\ L1_i, & \text{иначе} \end{cases} \quad \#(8)$$

Счетчик компенсации. При изменении параметра L_i запускается счетчик, который считает до значения $stop$.

$$c_i = \begin{cases} c_{i-1} + 1, & \text{при } (L0_{i-1} \neq L1_{i-1}) \wedge (c_{i-1} < stop) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad \#(9)$$

С учетом введенных сигналов алгоритм работы нерекурсивной части фильтра:

$$y_i = (L0_i - 1)x_i - (L0_{i-1} + 1)x_{i-1} + 2(b0_{i,L2i-2} + b0_{i,L2i-1}) - \quad \#(10) \\ - (L2_i + 1)b0_{i,2 \cdot L2i-3} + (L2_i - 1)b0_{i,2 \cdot L2i-2} + 2(b1_{i,L3i-2} + b1_{i,L3i-1}) - \\ - (L3_i + 1)b1_{i,2 \cdot L3i-3} + (L3_i - 1)b1_{i,2 \cdot L3i-2}.$$

Практическая реализация. Вид структуры управляемого РКИХ-фильтра с ИХ в виде окна Ханна представлен на рис. 1. Принцип работы структуры заключается в параллельной фильтрации отсчетов, которые еще не скомпенсированы, и новых входных отсчетов, к которым применяется новое значение параметра L .

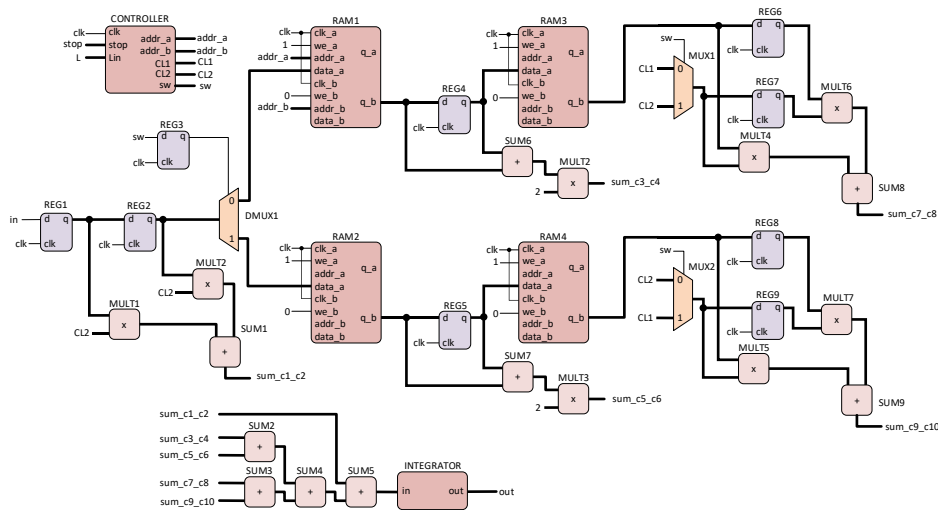


Рис. 1. Структура управляемого РКИХ-фильтра с ИХ в виде окна Ханна

В MULT1 и MULT2 выполняется перемножение выходных сигналов регистров REG1 и REG2 на первые два коэффициента нерекурсивной части. Демультимплексор DMUX1 переключает сигнал, задержанный на 1 такт (сигнал с выхода REG2), на запись в RAM в которой значения во всех ячейках памяти равны нулю. Второй выход DMUX1 подтянут к нулю. В рамках представленной схемы, компоненты RAM1, RAM3 и RAM2, RAM4 представляют собой две параллельные управляемые задержки, которые можно описать с помощью (3) и (4) соответственно. Принципы работы с блоками RAM-памяти в ПЛИС достаточно подробно описана в [18]. Внутреннее строение блока INTEGRATOR представляет собой каскадное подключение четырех цифровых интеграторов [19]. Принципы работы логических элементов, представленных на рис. 1, достаточно подробно описана в [20–22].

Результат моделирования работы фильтра, полученный с помощью инструмента waveform в программе Quartus Prime. Для наглядности, в качестве входного сигнала использовались единичные значения в начале входной последовательности при $L = 8$ и в момент изменения параметра L на 6.

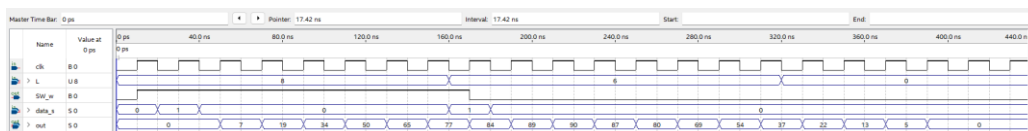


Рис. 2. Результат моделирования структуры управляемого РКИХ-фильтра с ИХ в виде окна Ханна в программе Quartus Prime

По результатам моделирования построен график, изображенный на рис. 3.

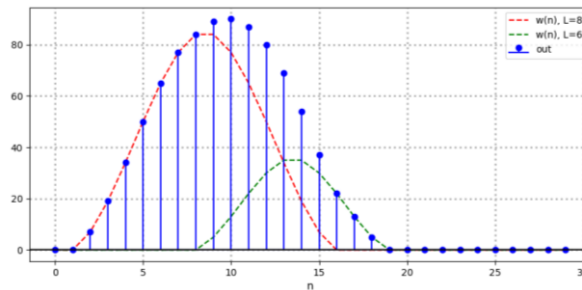


Рис. 3. График сравнения результата моделирования структуры управляемого РКИХ-фильтра и ИХ неуправляемых РКИХ в виде окна Ханна

Красным и зеленым цветом отображаются ИХ РКИХ-фильтров с ИХ в виде окна Ханна при значениях L равным 8 и 6 соответственно. Синим цветом обозначен результат работы исследуемого управляемого РКИХ-фильтра. Можно сделать вывод, что сигнал на выходе фильтра при изменении параметра L является суммой результата работы фильтра до изменения L и после изменения. За счет разработанной структуры фильтр является устойчивым при изменении параметра L , что видно из полученных результатов.

Заключение. Разработана структура, предназначенная для реализации фильтрации отсчетов до изменения длительности ИХ и после в виде двух отдельных фильтров, что позволяет компенсировать отсчёты в интеграторе при изменении параметра длительности ИХ. Данная структура, выполняющая фильтрацию в двух отдельных фильтрах с последующим суммирование результата основана на принципе линейности системы.

Одним из ключевых преимуществ предложенной структуры является применения блоков двухпортовой RAM-памяти вместо регистров и мультиплексоров для формирования линий управляемой задержки, которая не расходует логические элементы.

Для проверки работоспособности и оценки эффективности предложенной структуры был проведен ряд экспериментов с использованием инструмента waveform в программе Quartus Prime, получены результат симуляции работы управляемого РКИХ-фильтра.

Предложенная в статье методика может быть применена для разработки управляемых РКИХ-фильтров с различными типами импульсных характеристик. В частности, она подходит для реализации фильтров с ИХ в виде окна Ханна, квазикосинусной или прямоугольной функции. Это делает методику применимой в различных приложениях цифровой обработки сигналов, таких как телекоммуникации, аудио- и видеообработка, а также в системах управления и автоматизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе изд.: пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 216 с.
3. Богнер Р., Константинович А. Введение в цифровую фильтрацию: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 216 с.
4. Lau B.K. Sreeram V. Design of low order approximately linear phase IIR filters // IEEE Symposium on Advances in Digital Filtering and Signal Processing.
5. Maximo A. Efficient finite impulse response filters in massively-parallel recursive systems // Journal of Real-Time Image Processing: collected papers. – 2015. – Vol. 12. – P. 603-611.
6. Dam H.H., Nordebo S., Teo K.L. Cantoni A. Design of linear phase FIR filters with recursive structure and discrete coefficients // IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing: collected papers. – Seattle, 1998. – P. 1269-1272.
7. Hassan F., Khorbathy S. Recursive implementation of exponential linear phase FIR filters // 18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems: collected papers. – Beirut, 2011. – P. 559-562.

8. Koshita S., Abe M., Kawamata M. Variable state-space digital filters using series approximations // *Digital Signal Processing*. – 2017. – Vol. 60. – P. 338-349.
9. Phuoc N.S. Variable IIR Digital Band-Pass and Band-Stop Filters // 2018 2nd International Conference on Imaging, Signal Processing and Communication (ICISPC). – IEEE, 2018. – P. 132-137.
10. Бакиун Д.И. Методика аппаратной реализации управляемого рекурсивного КИХ-фильтра с прямоугольной импульсной характеристикой на ПЛИС // XXI Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов: Сб. трудов. – Таганрог, 2023. – С. 21-25.
11. Бакиун Д.И., Турулин И.И. Методика построения структуры рекурсивного фильтра с конечной импульсной характеристикой в виде функции, аппроксимирующей окно Ханна // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 3. – С. 64-70.
12. Турулин И.И. Расчет и применение быстродействующих цифровых рекурсивных фильтров с конечной импульсной характеристикой: монография / под общей ред. Л.К. Самойлова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 88 с.
13. Турулин И.И. Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 264 с.
14. Олейникова Т.В. Исследование алгоритмов рекурсивных фильтров с конечными импульсными характеристиками для весовой обработки сигналов: дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 1999.
15. Олейникова Т.В. Применение быстрой циклической свертки в корреляционном измерителе временных интервалов // Тез. докл. всерос. науч. конф. «Новые информационные технологии. Информационное, программное и аппаратное обеспечение». – Таганрог, 1995. – С. 178-179. 38.
16. Олейникова Т.В., Турулин И.И. Весовая обработка близко расположенных сигнала и помехи окнами с характеристиками типа окна Хэмминга // Тез. докл. всерос. науч. конф. «Радиоэлектроника, микроэлектроника, системы связи и управления». – Таганрог, 1997. – С. 232-233.
17. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1975.
18. Соловьев В.В. Логическое проектирование встраиваемых систем на FPGA. – СПб.: ООО «Медиа Группа Файнстрит», 2021. – 222 с.
19. Sklyarov V. FPGA-based implementation of recursive algorithms // *Microprocessors and Microsystems*. Special Issue on FPGAs: Applications and Designs. – 2004. – Vol. 28/5-6. – P. 197-211.
20. Томас Д. Логическое проектирование и верификация систем на System Verilog: пер. с англ. А.А. Слинкина, А.С. Камкина, М.М. Чупилко. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 384 с.
21. Хаханов В.И., Хаханов И.В., Литвинова Е.И., Гузь О.А. Проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах. Verilog & System Verilog. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – 528 с.
22. Уэйкерли Ф. Проектирование цифровых устройств. Т. 1. – М.: Постмаркет, 2002. – 544 с.

REFERENCES

1. Layons R. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]: Second ed.: transl. from engl. Moscow: ООО «Binom-Press», 2006. 656 p.
2. Rabiner L., Gould B. Teoriya i primenenie tsifrovoy obrabotki signalov [Theory and application of digital signal processing]: transl. from engl. Moscow: Mir, 1976. 216 p.
3. Bogner R., Konstantinidis A. Vvedenie v tsifrovuyu fil'tratsiyu [Introduction to digital filtering]: transl. from engl. Moscow: Mir, 1976. 216 p.
4. Lau B.K., Sreeram V. Design of low order approximately linear phase IIR filters, *IEEE Symposium on Advances in Digital Filtering and Signal Processing*.
5. Maximo A. Efficient finite impulse response filters in massively-parallel recursive systems, *Journal of Real-Time Image Processing: collected papers*, 2015, Vol. 12, pp. 603-611.
6. Dam H.H., Nordebo S., Teo K.L., Cantoni A. Design of linear phase FIR filters with recursive structure and discrete coefficients, *IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing: collected papers*. Seattle, 1998, pp. 1269-1272.
7. Hassan F., Khorbotly S. Recursive implementation of exponential linear phase FIR filters, *18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems: collected papers*. Beirut, 2011, pp. 559-562.
8. Koshita S., Abe M., Kawamata M. Variable state-space digital filters using series approximations, *Digital Signal Processing*, 2017, Vol. 60, pp. 338-349.
9. Phuoc N.S. Variable IIR Digital Band-Pass and Band-Stop Filters, *2018 2nd International Conference on Imaging, Signal Processing and Communication (ICISPC)*. IEEE, 2018, pp. 132-137.
10. Bakshun D.I. Metodika apparatnoy realizatsii upravlyаемого rekursivnogo KIKh-fil'tra s pryamougol'noy impul'snoy kharakteristikoy na PLIS [Methodology for hardware implementation of a controlled recursive FIR filter with a rectangular impulse response on an FPGA], *XXI Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov: Sb. trudov* [XXI All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students: Collected papers]. Taganrog, 2023, pp. 21-25.

11. *Bakshun D.I., Turulin I.I.* Metodika postroeniya struktury rekursivnogo fil'tra s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy v vide funktsii, approksimiruyushchey okno Khanna [A technique for constructing the structure of a recursive filter with a finite impulse response in the form of a function approximating the Hann window], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3, pp. 64-70.
12. *Turulin I.I.* Raschet i primeneniye bystrodeystviyushchikh tsifrovyykh rekursivnykh fil'trov s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy: monografiya [Calculation and application of high-speed digital recursive filters with finite impulse response: monograph], under the general ed. of L.K. Samoylova. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1999, 88 p.
13. *Turulin I.I.* Osnovy teorii rekursivnykh KIKh-fil'trov: monografiya [Fundamentals of the theory of recursive FIR filters: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 264 p.
14. *Oleynikova T.V.* Issledovanie algoritmov rekursivnykh fil'trov s konechnymi impul'snymi kharakteristikami dlya vesovoy obrabotki signalov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of algorithms for recursive filters with finite impulse characteristics for weight signal processing: cand. of eng. sc. diss.]. Taganrog, 1999.
15. *Oleynikova T.V.* Primeneniye bystroy tsiklicheskoy svertki v korrelyatsionnom izmeritele vremennykh intervalov [The use of fast cyclic convolution in a correlation time interval meter], *Tez. dokl. vseros. nauch. konf. «Novye informatsionnye tekhnologii. Informatsionnoe, programnoye i apparatnoye obespechenie»* [Abstracts of the reports of the All-Russian scientific conference "New information technologies. Information, software and hardware"]. Taganrog, 1995, pp. 178-179. 38.
16. *Oleynikova T.V., Turulin I.I.* Vesovaya obrabotka blizko raspolozhennykh signalov i pomekhi oknami s kharakteristikami tipa okna Khemmign [Weight processing of closely spaced signal and interference by windows with characteristics of the type of a Hammign window], *Tez. dokl. vseros. nauch. konf. "Radioelektronika, mikroelektronika, sistemy svyazi i upravleniya"* [Abstracts of reports of the All-Russian scientific conference. "Radio electronics, microelectronics, communication and control systems"]. Taganrog, 1997, pp. 232-233.
17. *Bronshcheyn I.N., Semendyaev K.A.* Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov [Handbook of Mathematics for engineers and university students]. Moscow: Nauka, 1975.
18. *Solov'ev V.V.* Logicheskoe proektirovaniye vstraivaemykh sistem na FPGA [Software design of an embedded system on FPGA]. Saint Petersburg: OOO «Media Gruppy Faynstrit», 2021, 222 p.
19. *Sklyarov V.* FPGA-based implementation of recursive algorithms, *Microprocessors and Microsystems. Special Issue on FPGAs: Applications and Designs*, 2004, Vol. 28/5-6, pp. 197-211.
20. *Tomas D.* Logicheskie proektirovaniye i verifikatsiya sistem na System Verilog [Logical design and verification of the Verilog system]: transl. from engl. A.A. Slinkina, A.S. Kamkina, M.M. Chupilko. Moscow: DMK Press, 2019, 384 p.
21. *Khakhanov V.I., Khakhanov I.V., Litvinova E.I., Guz' O.A.* Proektirovaniye i verifikatsiya tsifrovyykh sistem na kristallakh. Verilog & System Verilog [Design and verification of digital systems on crystals. Verilog and the Verilog system]. Khar'kov: KhNURE, 2010, 528 p.
22. *Ueykerli F.* Proektirovaniye tsifrovyykh ustroystv [Design of digital devices]. Vol. 1. Moscow: Postmarket, 2002, 544 p.

Бакшун Дмитрий Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: bakshun@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185988588; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант; ассистент.

Тарасов Сергей Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: tsp-47@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел. +79034007904; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Турулин Игорь Ильич – Южный федеральный университет; e-mail: iiturulin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79618170609; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Bakshun Dmitry Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: bakshun@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185988588; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; postgraduate student; assistant.

Tarasov Sergey Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: tsp-47@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79034007904; the Department of Electrohydroacoustic and Medical Technology Grand; dr. in eng. sc.; professor.

Turulin Igor Ilyich – Southern Federal University; e-mail: iiturulin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79618170609; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; dr. in eng. sc.; professor.

В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, А.Ю. Головин, Д.С. Мироненко

**МАЛОГАБАРИТНЫЙ СВАРОЧНЫЙ ИНВЕРТОР ДЛЯ
ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПЕРЕМЕННЫМ
ТОКОМ**

Рассмотрен вопрос особенностей проектирования малогабаритного сварочного инвертора для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током, отличающегося улучшенными массогабаритными характеристиками и сниженными потерями энергии благодаря отсутствию выходного выпрямителя. Показано, что при питании сварочной дуги переменным током высокой частоты, возникают проблемы: изменяющаяся индуктивность сварочного контура представляет на частотах преобразования в десятки кГц значительное реактивное сопротивление, ограничивающее ток дуги; при высокой частоте начинает проявлять себя поверхностный эффект (скин-эффект). Для решения проблемы предложена схема инверторного источника питания с компенсацией реактивного сопротивления путем последовательного включения в сварочную цепь конденсатора и введения частотного управления током получившегося резонансного контура. Целью работы является разработка сварочного инвертора для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током, обеспечивающим качественное протекание процесса. В результате исследования разработан проект и изготовлен малогабаритный сварочный инвертор для полуавтоматической дуговой сварки высокочастотным переменным током. Лабораторные испытания источника показали устойчивое горение дуги и стабильное протекание процесса. Разработанный инвертор может быть легко модифицирован для увеличения сварочного тока. Структура силовой части разработанного сварочного источника позволяет также использовать его для решения задач индукционного нагрева путем подключения к выходным клеммам индуктора индуктивностью $2...7\text{ мкГн}$ и введении в управляющую программу микроконтроллера незначительных корректировок для реализации управления током индуктора. Благодаря повышенному коэффициенту мощности разработанный источник потребляет от сети ток, на 25...40 % меньший, чем широко распространенные на рынке сварочные инверторы без корректора коэффициента мощности, что снижает нагрузку на распределительную сеть и позволяет проводить сварочные работы при питании от «слабой» сети или при большой длине сетевого провода.

Сварочный инверторный источник; полуавтоматическая сварка; высокая частота; последовательный резонансный контур; поверхностный эффект.

V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, A.Y. Golovin, D.S. Mironenko

**SMALL-SIZED WELDING INVERTER FOR SEMI-AUTOMATIC WELDING
WITH HIGH FREQUENCY AC CURRENT**

The design of a small-sized high-efficiency welding inverter with high-frequency alternating current output for semi-automatic welding is considered. The inverter is distinguished by good power density and lowered power losses due to absence of output power rectifier. It is shown that when high-frequency alternating current is supplied to the welding arc, several problems arise: the non-constant inductance of the welding circuit presents a significant reactance at conversion frequencies of tens of kHz, limiting the arc current; at high frequency, a surface effect (skin effect) begins to manifest itself. To solve the problem of current limitation, a scheme with reactance compensation is proposed by connecting a capacitor in series with the welding circuit and introducing frequency control of the current in the resulting series-resonant circuit. The aim of the work is to develop a welding inverter for semi-automatic welding with high-frequency alternating current, ensuring high-quality process flow. As a result of the research, a small-sized welding inverter for semi-automatic arc welding with high-frequency alternating current was developed and prototyped. Laboratory tests of the designed inverter have shown steady arc burning and stable process flow. The developed inverter can be easily modified to increase the welding current. The structure of the power section of the developed welding power supply also allows it to be used for induction heating tasks by connecting an inductor with an inductance of $2...7\text{ }\mu\text{H}$ to the output terminals and introducing minor adjustments into the microcontroller control program to implement inductor current control. Thanks to the increased power factor, the developed inverter current drawn from the supply grid is 25...40% lower than that of the widespread welding inverters without a power factor corrector. This reduces the load on the distribution supply grid and allows welding operations to be carried out when powered from a "weak" grid or with a long power cable.

Welding inverter power supply; semi-automatic welding; high frequency; series resonant circuit; skin effect.

Введение. Полуавтоматическая сварка нашла широкое применение в промышленности и быту. Сварка производится сплошной или флюсовой проволокой, подаваемой в сварочную ванну. В зависимости от вида защиты сварочной ванны от внешней среды различают процессы полуавтоматической сварки в среде активного газа (MAG – Metal Active Gas), в среде инертного газа (MIG – Metal Inert Gas) либо самозащищенной флюсовой проволокой (FCAW – Flux Cored Arc Welding).

Для питания электрической дуги при полуавтоматической сварке используются источники с жесткой внешней характеристикой, т.е. с напряжением, слабо зависящим от выходного тока. Сварка может производиться как на прямой, так и на обратной полярности. При использовании флюсовой проволоки диаметром 0,8 – 1,0 мм обычно рекомендуется прямая полярность (отрицательный полюс на электроде).

В качестве источников питания в настоящее время обычно используются сварочные инверторы, отличающиеся хорошими массогабаритными показателями, удобством пользования и широким диапазоном настроек параметров режима сварки.

Инверторный источник состоит из входного выпрямителя, от которого питается инвертор, нагруженный на высокочастотный силовой трансформатор, ко вторичной обмотке которого подключен силовой выпрямитель [1–5]. Инвертор может быть построен с применением большого числа схемных решений и алгоритмов управления [6–10]. Обычно применяются инверторы с «жестким» переключением силовых ключей, а для снижения коммутационных потерь используют цепи формирования траектории переключения [7, 8]. Резонансные преобразователи [11] применяются реже из-за сложности управления при работе на нестационарную нагрузку, которой является электрическая сварочная дуга.

За счет использования различных алгоритмов управления инвертором решаются задачи управления качеством сварочного процесса [12–17]. Это и управление переносом электродного металла, и обеспечение стабильности горения дуги, и облегчение ее поджига (или обеспечение бесконтактного поджига).

Также при проектировании сварочного источника следует учитывать его влияние на сеть [18], которое в общем виде характеризуется коэффициентом мощности. Эмиссия высших гармоник тока в сеть приводит к росту действующего потребляемого тока, искажению формы сетевого напряжения в точке подключения источника, может приводить к некорректной работе иного оборудования, подключенного к сети. Ограничение эмиссии гармонических составляющих тока нормируется стандартами [19, 20].

Проблемы при дуговой сварке высокочастотным током. Представляет интерес реализация процесса полуавтоматической сварки с питанием дуги высокочастотным переменным током [21]. Дело в том, что на выходной силовой выпрямитель приходится более половины потерь мощности в источнике, поскольку использующиеся в выходном силовом выпрямителе быстровосстанавливающиеся силовые диоды зачастую имеют повышенное прямое напряжение по сравнению с низкочастотными аналогами, при этом они работают со значительными (сварочными) токами. Исключив выходной выпрямитель из источника, можно значительно снизить потери мощности в нем, а также несколько уменьшить его габариты и массу.

Однако, при сварке высокочастотным током возникает ряд специфических проблем.

Во-первых, индуктивность сварочного контура (кабелей и изделия) представляет на частотах преобразования в десятки кГц значительное реактивное сопротивление, ограничивающее ток дуги.

Во-вторых, с повышением частоты начинает проявлять себя поверхностный эффект (скин-эффект), т.е. увеличение активного сопротивления сварочного кабеля из-за протекания тока преимущественно по его поверхности. По этой причине эксперименты по ручной дуговой сварке током высокой частоты, проведенные авторами, оказались неудачными из-за перегрева электродной проволоки, потери ей прочности и осыпания обмазки. Уменьшить негативное влияние скин-эффекта можно, используя сварочные кабели небольшой длины.

Схема силовой части источника. Для решения проблемы индуктивного сопротивления сварочного контура авторами предложен подход к компенсации реактивного сопротивления путем последовательного включения в сварочную цепь конденсатора и вве-

дения частотного управления током получившегося резонансного контура. Поскольку электрическая дуга является нестационарной нагрузкой, система управления должна иметь хорошую динамику и быстро реагировать на изменяющиеся условия горения дуги. Для решения этой задачи разработана методика идентификации параметров резонансного контура, позволяющая сократить время переходного процесса регулирования тока дуги.

Схема силовой части источника приведена на рис. 1.

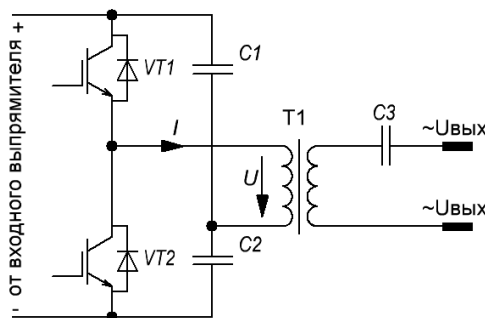


Рис. 1. Схема силовой части источника для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током

Трансформатор Т1 выполнен на ферритовом кольцевом сердечнике и имеет значительную индуктивность обмоток (порядка единиц мГн), намного большую, чем индуктивность цепи нагрузки (единицы-десятки мкГн). Это позволяет без существенной потери точности пренебречь током намагничивания Т1 в дальнейших рассуждениях.

Полумостовой инвертор VT1VT2 нагружен на резонансный последовательный контур. Индуктивность контура образована индуктивностью рассеяния Т1 и приведенной индуктивностью вторичной цепи (т.е. сварочных кабелей). Емкость контура образована параллельно включенными С1 и С2 и последовательно включенной емкостью С3, приведенной к первичной цепи Т1.

Активное сопротивление контура – сумма активных сопротивлений всех элементов – главным образом определяется приведенным к первичной цепи Т1 активным сопротивлением нагрузки.

Проектирование источника. Рассмотрим процесс проектирования источника для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током.

Обозначив напряжение основной гармоники на первичной обмотке Т1 как U , а ток основной гармоники в этой обмотке как I , можно изобразить векторную диаграмму (рис. 2).

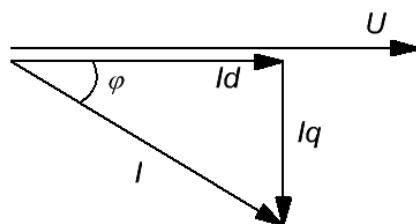


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений и токов первичной обмотки трансформатора

Ток представлен в виде векторной суммы синфазной компоненты, обозначенной I_d , и квадратурной компоненты, обозначенной I_q .

Угол φ сдвига фаз между напряжением и током изображен отрицательным, т.е. ток имеет индуктивный характер и $I_q < 0$. Это основной режим работы инвертора, поскольку при индуктивной нагрузке имеет место «мягкое» включение силовых транзисторов и отсутствуют потери, связанные с обратным восстановлением антипараллельных диодов.

Для измерения тока в системе управления используется АЦП, производящий выборки (отсчеты) тока с 4-кратной частотой переключения инвертора, т.е. с интервалом 90 электрических градусов.

Обозначим отсчеты тока $i_0 \dots i_3$. Отсчеты i_0 и i_1 берутся на положительной полуволне (i_0 синхронизирован с открытием VT1), а i_2 и i_3 – на отрицательной. При согласовании уровней сигнала тока с входом АЦП микроконтроллера в сигнал добавляется постоянная составляющая порядка половины полной шкалы АЦП. Обозначим ее I_0 . Считая ток нагрузки синусоидальным, поскольку из-за высокой добротности нагрузочной цепи токи высших гармоник в ней малы, можно записать:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) + I_0,$$

где ω – частота переключения ключей инвертора.

Подставляя вместо ωt электрические углы $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$, соответствующие выборкам тока, получаем:

$$\begin{aligned} i_0 &= I_m \sin(\varphi) + I_0; \\ i_1 &= I_m \cos(\varphi) + I_0; \\ i_2 &= -I_m \sin(\varphi) + I_0; \\ i_3 &= -I_m \cos(\varphi) + I_0. \end{aligned}$$

Поскольку основная гармоника выходного напряжения инвертора имеет начальную фазу 0, т.е. $u(t) = U_m \sin(\omega t)$, расчет амплитуд синфазной и квадратурной компонент целесообразно проводить следующим образом:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{i_0 - i_2}{2}; \\ I_q &= \frac{i_1 - i_3}{2}. \end{aligned}$$

$$\text{Далее рассчитывается полный ток } I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}.$$

Постоянная составляющая в сигнале измерения тока определяется как

$$I_{DC} = \frac{i_0 + i_1 + i_2 + i_3}{4}.$$

В установившемся режиме I_{DC} имеет величину половины полной шкалы АЦП, т.е. $I_{DC} \approx I_0$. В переходном же процессе это равенство нарушается из-за появления свободной составляющей тока, что используется для идентификации переходных режимов и исключения использования недостоверных данных при расчетах параметров нагрузочной цепи. Так, в экспериментальной практической реализации программы контроллера данные считаются недостоверными, если $(I_{DC} - I_0)^2 > \frac{I^2}{128}$.

Идентификация параметров контура реализована следующим образом.

Запишем баланс активной мощности:

$$UI \cos \varphi = UI_d = I^2 R,$$

где R – активное сопротивление контура, приведенное к первичной обмотке Т1.

Отсюда

$$R = \frac{UI_d}{I^2}.$$

Баланс реактивной мощности может быть записан следующим образом:

$$UI \sin \varphi = UI_q = I^2 X,$$

где X – реактивное сопротивление контура, приведенное к первичной обмотке Т1.

Отсюда

$$X = \frac{UI_q}{I^2}.$$

Но $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$, где L и C – индуктивность и емкость контура, приведенные к первичной обмотке Т1. Причем емкость C не зависит от цепи нагрузки (которая является активно-индуктивной) и может быть определена как

$$C = C1 + C2 + C3 \cdot K_{T1}^2,$$

где K_{T1} – коэффициент трансформации Т1.

Учитывая это, приведенная индуктивность контура определится как

$$L = \frac{X}{\omega} - \frac{1}{\omega^2 C}.$$

Зная R , L и C нагрузочного контура, можно рассчитать требуемую частоту переключения ω^* для выхода на режим с заданным током I^* при известном напряжении питания U инвертора. Поскольку частота переключения влияет только на реактивную компоненту импеданса контура, запишем требуемое реактивное сопротивление:

$$X^* = \sqrt{\left(\frac{U}{I^*}\right)^2 - R^2}.$$

Требуемая частота при условии работы с индуктивным током:

$$\omega^* = \frac{X^*}{2L} + \sqrt{\left(\frac{X^*}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}.$$

Здесь следует учесть, что определение тока задания I^* должно быть реализовано так, чтобы обеспечить требуемый вид выходной характеристики источника. Так, если требуется получить жесткую характеристику с напряжением U^* на активной нагрузке, то $I^* = \frac{U^*}{R}$.

В некоторых случаях интерес представляет характеристика с постоянной мощностью, тогда $I^* = \sqrt{\frac{P^*}{R}}$, где P^* – уставка по мощности.

Для повышения коэффициента мощности разработанного источника входной выпрямитель выполнен по схеме «Valley-Fill» (рис. 3).

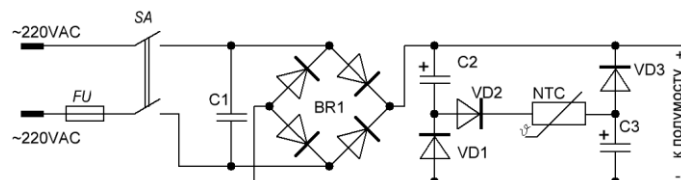


Рис. 3. Входная цепь источника для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током

Конденсатор $C1$ – блокировочный, препятствует проникновению высокочастотных компонент тока в сеть. Цепь Valley-Fill, установленная после диодного моста BR1, обеспечивает поддержание напряжения не ниже половины амплитудного напряжения сети питания. Работает она следующим образом.

При переходе модуля напряжения сети через максимум конденсаторы $C2$ и $C3$ заряжаются по цепи «(+BR1) – $C2$ – $VD2$ – NTC – $C3$ – (–BR1)». Поскольку они при этом включены последовательно, напряжение на каждом из них достигает половины амплитуды напряжения сети. Термистор NTC служит для ограничения начального тока заряда $C2$ и $C3$ при начальном включении источника в сеть выключателем SA.

В течение времени, когда модуль мгновенного напряжения сети меньше напряжения на $C2$ или $C3$, открываются диоды $VD1$ и/или $VD3$, что приводит к подпитке полумоста от $C2$, $C3$. Причем в этом случае конденсаторы включены параллельно. Диоды моста BR1 в это время закрыты и ток от сети не потребляется.

Большую часть времени нагрузка (полумост) питается выпрямленным напряжением сети, диоды VD1 – VD3 закрыты. Эта особенность позволяет путем управления активной мощностью полумоста формировать ток сети таким образом, чтобы его мгновенное значение было пропорционально мгновенному напряжению сети. Тогда схема по отношению к сети будет вести себя как активное сопротивление, что обеспечит повышенный коэффициент мощности. В то же время имеющийся в накопительных конденсаторах C2, C3 запас энергии позволяет обеспечить поддержание горения дежурной дуги во время перехода сетевого напряжения через ноль, тем самым поддерживать стабильность сварочного процесса.

Применение схемы выпрямителя Valley-Fill позволяет: снизить запас энергии в накопительных конденсаторах C2, C3; применить для ограничения тока начального заряда термистор вместо мощного резистора и силового реле; обеспечить стабильность сварочного процесса и повысить коэффициент мощности источника.

На рис. 4 приведены фото платы силовой части описанного источника.



Рис. 4. Плата силовой части источника для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током – слева лицевая сторона, справа – обратная

Управление реализовано на однокристальном микроконтроллере STM32F103C8T6, имеющем два бортовых 12-битных АЦП со скоростью до 1 MSPS каждый. Это позволило выполнять синхронную оцифровку напряжения питания и выходного тока полумоста. Резонансный конденсатор составлен из трех параллельно включенных металлопленочных конденсаторов МКРН по $0,75 \text{ мкФ} \times 1200 \text{ В}$, предназначенных для работы в силовых резонансных контурах.

Вид источника в корпусе приведен на рис. 5.



Рис. 5. Разработанный источник в корпусе – слева; справа – со снятой верхней крышкой

Лабораторные испытания источника показали его работоспособность, стабильность протекания процесса полуавтоматической сварки на переменном токе. Частота тока составляла 50...70 кГц. Для осциллографирования тока применялся специализированный датчик тока CP2100A с частотным диапазоном до 800 кГц. Измерения проводились в первичной цепи высокочастотного силового трансформатора, поскольку датчик CP2100A позволяет измерять ток с амплитудой до 100 А, а действующее значение сварочного тока составляло до 130 А при амплитуде более 180 А, что выходит за пределы рабочего диапазона датчика. Для измерения коэффициента мощности разработанного источника применялся измеритель Everfine PF9901 с пределом измерения по току 40 А. Во время сварки коэффициент мощности источника находился в пределах 0,9...0,95.

Заключение. Разработан и изготовлен малогабаритный сварочный инвертор для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током. Испытания источника при полуавтоматической сварке флюсовой проволокой E71T-GS диаметром 0,8 мм показали устойчивое горение дуги и возможность обеспечения сварочного процесса при питании дуги высокочастотным переменным током. При необходимости сварки проволокой диаметром 1,0...1,2 мм разработанный инвертор может быть легко модифицирован для увеличения сварочного тока.

Структура силовой части источника позволяет также использовать его для решения задач индукционного нагрева путем подключения к выходным клеммам индуктора индуктивностью 2...7 мкГн и введении в управляющую программу микроконтроллера незначительных корректировок для реализации управления током индуктора.

Благодаря повышенному коэффициенту мощности разработанный источник потребляет от сети ток, на 25...40 % меньший, чем широко распространенные на рынке сварочные инверторы без корректора коэффициента мощности, что снижает нагрузку на распределительную сеть и позволяет проводить сварочные работы при питании от «слабой» сети или при большой длине сетевого провода.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FRRG-2023-0009.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурлака В.В., Гулаков С.В., Головин А.Ю., Федосов А.В., Зареченский Д.А., Псарева И.С. Универсальный аппарат для сварки в полевых условиях // Сварочное производство. – 2024. – № 2. – С. 44-49. – DOI: 10.34641/SP.2024.1065.2.013.
2. Зареченский Д.А., Гулаков С.В., Бурлака В.В., Федосов А.В., Головин А.Ю. Анализ сварочных свойств и энергопотребления однофазных источников питания дуговой сварки // Сварочное производство. – 2024. – № 1. – С. 46-49. – DOI: 10.34641/SP.2024.1064.1.006.
3. Burlaka V., Gulakov S., Podnebennaya S., Kudanova E., Savenko O. Bidirectional single stage isolated DC-AC converter // In proceedings of 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week), Kharkiv, 05-10 October 2020. – Kharkiv: National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2020. – P. 343-346.
4. Burlaka V.V., Podnebennaya S.K., Gulakov S.V. Low-Cost Transformerless Grid-Tie Inverter for Photovoltaic System // In proceedings of 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, 17-19 April, 2019. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. – P. 334-338.
5. Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. Power Supply of Resistance Welding Machine with Reactive Power Compensation // In proceedings of 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics And Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 16-18 April, 2019. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. – P. 648-651.
6. Бардин А., Джаникян А., Никитин С., Романов А. Инверторное сварочное оборудование // Силовая электроника. – 2008. – № 3. – С. 116-119.
7. A New PWM ZVS Full-Bridge Converter Yungtaek Jang and Milan M. Jovanovic', Power Electronics Laboratory, Delta Products Corporation, P. O. Box 12173, 5101 Davis Drive, Research Triangle Park, NC 27709, 2006.
8. Петров С. Схемотехника промышленных сварочных инверторов // Современная электроника. – 2007. – № 8. – С. 42-47.
9. Петров С. Однотактный прямоходовой мостовой конвертер: области применения и развитие схемотехники // Силовая электроника. – 2009. – № 5. – С. 74-81.
10. STMicroelectronics, AN3200 “2.5 kW MMA welding machine”, September 2010.

11. *Верещаго Е.Н., Квасницкий В.Ф., Костюченко В.И.* Квазирезонансный источник питания Plasma 110i HF для плазменной резки // Сварочное производство. – 2008. – № 6. – С. 37-41.
12. *Schupp J., Fischer W., and Mecke H.* Welding Arc Control with Power Electronics // IEE Power Electronics and Variable Speed Drives Conference. – 2000. – P. 443-450.
13. *Tomsic M.J., Crump N. and others.* The welding handbook: Welding processes. – Vol. 2. – 8th ed. American Welding Society. Miami (USA). – P. 2-29, 73-80.
14. *Савчук В.С., Плехов А.С.* Управление сварочным инвертором для электросварки труб высокого давления // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 4. – С. 43-54. – DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_43.
15. *Володин В.Я.* Продвинутые источники сварочного тока // Силовая электроника. – 2014. – № 4.
16. *Фурман Е.Л., Толстых Л.Г., Толстых А.Л., Лепинских В.Б.* Импульсный инверторный источник ИНТАЛ-500И для сварки // Сварочное производство. – 2015. – № 10. – С. 40-43.
17. *Князьков А.Ф., Князьков С.А., Деменцев К.И.* Инверторный источник питания для сварки модулированным током // Сварочное производство. – 2008. – № 5. – С. 18-22.
18. *Коротынский А.Е., Копиленко Е.А., Павленко Г.В., Павленко Г.Л.* Оценка параметров электромагнитной совместимости оборудования для дуговой сварки // Сварочное производство. – 2005. – № 11. – С. 9-12.
19. ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 28 с.
20. ГОСТ Р 51317.3.4-2006 (МЭК 61000-3-4:1998). Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение эмиссии гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током более 16А, подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 15 с.
21. *Бардин В.М., Борисов Д.А.* Целесообразность и возможности создания сварочных аппаратов переменного тока высокой частоты // Сварочное производство. – 2010. – № 6. – С. 35-38.

REFERENCES

1. *Burlaka V.V., Gulakov S.V., Golovin A.Yu., Fedosov A.V., Zarechenskiy D.A., Psareva I.S.* Universal'nyy apparat dlya svarki v polevykh usloviyakh [Universal device for welding in the field], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2024, No. 2, pp. 44-49. DOI: 10.34641/SP.2024.1065.2.013.
2. *Zarechenskiy D.A., Gulakov S.V., Burlaka V.V., Fedosov A.V., Golovin A.Yu.* Analiz svarochnykh svoystv i energopotrebleniya odnofaznykh istochnikov pitaniya dugovoy svarki [Analysis of welding properties and energy consumption of single-phase arc welding power sources], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2024, No. 1, pp. 46-49. DOI: 10.34641/SP.2024.1064.1.006.
3. *Burlaka V., Gulakov S., Podnebennaya S., Kudinova E., Savenko O.* Bidirectional single stage isolated DC-AC converter, *In proceedings of 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week), Kharkiv, 05-10 October 2020*. Kharkiv: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2020, pp. 343-346.
4. *Burlaka V.V., Podnebennaya S.K., Gulakov S.V.* Low-Cost Transformerless Grid-Tie Inverter For Photovoltaic System, *In proceedings of 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, 17-19 April, 2019*. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019, pp. 334-338.
5. *Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V.* Power Supply of Resistance Welding Machine with Reactive Power Compensation, *In proceedings of 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics And Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 16-18 April, 2019*. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019, pp. 648-651.
6. *Bardin A., Dzhanikyan A., Nikitin S., Romanov A.* Invertornoe svarochnoe oborudovanie [Inverter welding equipment], *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2008, No. 3, pp. 116-119.
7. A New PWM ZVS Full-Bridge Converter Yungtaek Jang and Milan M. Jovanovic', Power Electronics Laboratory, Delta Products Corporation, P. O. Box 12173, 5101 Davis Drive, Research Triangle Park, NC 27709, 2006.
8. *Petrov S.* Skhemotekhnika promyshlennykh svarochnykh inverterov [Circuitry of industrial welding inverters], *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2007, No. 8, pp. 42-47.
9. *Petrov S.* Odnokontaknyy pryamokhodovoy mostovoy konverter: oblasti primeneniya i razvitiye skhemotekhniki [Single-ended forward bridge converter: areas of application and development of circuitry], *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2009, No. 5, pp. 74-81.
10. STMicroelectronics, AN3200 "2.5 kW MMA welding machine", September 2010.
11. *Vereshchago E.N., Kvasnitskiy V.F., Kostyuchenko V.I.* Kvazirezonsnnyy istochnik pitaniya Plasma 110i HF dlya plazmennoy rezki [Quasi-resonant power source Plasma 110i HF for plasma cutting], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2008, No. 6, pp. 37-41.

12. Schupp J., Fischer W., and Mecke H. Welding Arc Control with Power Electronics, *IEEE Power Electronics and Variable Speed Drives Conference*, 2000, pp. 443-450.
13. Tomsic M.J., Crump N. and others. The welding handbook: Welding processes, Vol. 2. 8th ed. American Welding Society. Miami (USA), pp. 2-29, 73-80.
14. Savchuk V.S., Plekhov A.S. Upravlenie svarochnym invertorom dlya elektrosvarki trub vysokogo davleniya [Control of a welding inverter for electric welding of high-pressure pipes], *Intellektual'naya elektrotehnika* [Intelligent electrical engineering], 2023, No. 4, pp. 43-54. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_43.
15. Volodin V.Ya. Prodvinutye istochniki svarochnogo toka [Advanced welding current sources], *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2014, No. 4.
16. Furman E.L., Tolstykh L.G., Tolstykh A.L., Lepinskikh V.B. Impul'snyy invertornyy istochnik INTAL-500I dlya svarki [Pulse inverter source INTAL-500I for welding], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2015, No. 10, pp. 40-43.
17. Knyaz'kov A.F., Knyaz'kov S.A., Dementsev K.I. Invertornyy istochnik pitaniya dlya svarki modulirovannym tokom [Inverter power source for welding with modulated current], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2008, No. 5, pp. 18-22.
18. Korotynskiy A.E., Kopilenko E.A., Pavlenko G.V., Pavlenko G.L. Otsenka parametrov elektromagnitnoy sovmestimosti oborudovaniya dlya dugovoy svarki [Evaluation of electromagnetic compatibility parameters of arc welding equipment], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2005, No. 11, pp. 9-12.
19. GOST R 51317.3.2-2006 (MEK 61000-3-2:2005). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Emissiya garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom ne bolee 16A (v odnoy faze). Normy i metody ispytaniy [GOST R 51317.3.2-2006 (IEC 61000-3-2:2005). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Emission of harmonic components of current by technical equipment with a consumed current of no more than 16 A (in one phase). Standards and test methods]. Moscow: Standartinform, 2007, 28 p.
20. GOST R 51317.3.4-2006 (MEK 61000-3-4:1998). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ogranichenie emissii garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom bolee 16A, podklyuchaemymi k nizkovol'tnym sistemam elektrosnabzheniya. Normy i metody ispytaniy [GOST R 51317.3.4-2006 (IEC 61000-3-4:1998). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Limitation of emission of harmonic components of current by technical equipment with a consumed current exceeding 16 A, connected to low-voltage power supply systems. Standards and test methods]. Moscow: Standartinform, 2007, 15 p.
21. Bardin V.M., Bopisov D.A. TSelesoobpaznost' i vozmozhnosti sozdaniya svapochnykh apparatov pepemennogo toka vysokoy chastoty [Feasibility and possibilities of creating high-frequency alternating current welding machines], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2010, No. 6, pp. 35-38.

Бурлака Владимир Владимирович – ФГБОУ ВО "ПГТУ"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; г. Мариуполь, Россия; тел.: +79497048603; научно-технический центр силовой электроники; д.т.н.; доцент; директор центра.

Гулаков Сергей Владимирович – ФГБОУ ВО "ПГТУ"; e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; г. Мариуполь, Россия; тел.: +79497298638; научно-технический центр силовой электроники; д.т.н.; профессор.

Головин Андрей Юрьевич – ФГБОУ ВО "ПГТУ"; e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; г. Мариуполь, Россия; тел.: +79497128054; научно-технический центр силовой электроники; м.н.с.

Мироненко Дмитрий Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79885153109; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Burlaka Vladimir Vladimirovich – FSBEI of HE "PSTU"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; Mariupol, Russia; phone: +79497048603; Scientific and Technical Center for Power Electronics; dr. of eng. sc.; associate professor; director of the center.

Gulakov Sergey Vladimirovich – FSBEI of HE "PSTU"; e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; Mariupol, Russia; phone: +79497298638; Scientific and Technical Center for Power Electronics; dr. of eng. sc.; professor.

Golovin Andrey Yurievich – FSBEI of HE "PSTU"; e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; Mariupol, Russia; phone: +79497128054; Scientific and Technical Center for Power Electronics; research associate.

Mironenko Dmitrii Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885153109; the Department of Software Engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

А.Е. Колоденкова, С.С. Верещагина**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ОБНАРУЖЕНИЮ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Электрооборудование (ЭО) играет ключевую роль в промышленных электротехнических системах, в которых неожиданные механические неисправности в процессе эксплуатации могут привести к тяжелым последствиям (нарушение технологического процесса, снижение качества и количества выпускаемой продукции, возникновение аварийных ситуаций). Для своевременного выявления подобных неисправностей, а также обеспечения нормальной работы систем необходимо проводить регулярное оценивание технического состояния ЭО с помощью современных компьютерных технологий в условиях неполной и нечеткой информации. Для решения данной проблемы предлагается подход с использованием квантования и сверточных нейронных сетей (СНС), отличающийся от существующих подходов комплексной обработкой термограмм, полученных с помощью тепловизионного устройства; изображений с черно-белыми и цветными графиками, полученных с приборов либо построенных по статистическим данным. Данный подход позволяет повысить точность классификации различных неисправностей ЭО, снизить неплановые отказы оборудования за счет оперативного принятия решений относительно технического состояния ЭО в условиях неполной и нечеткой информации. Обзор исследований в данной предметной области как российских, так и зарубежных ученых отражает целый ряд успешных экспериментов по использованию СНС. Разработанная СНС для классификации неисправностей на выходе выдает номер класса, к которому относится текущее состояние оборудования (класс 1 – работоспособное ЭО; класс 2 – работоспособное ЭО с небольшими отклонениями). В настоящей работе рассматриваются обобщенная схема и алгоритм комплексного подхода к обнаружению неисправностей ЭО с подробным их описанием. Результаты исследования были получены при диагностировании асинхронного двигателя АИР63А4У1 и подтверждают обоснованность и объективность использования предложенного подхода.

Техническое состояние электрооборудования; сверточная нейронная сеть; классификация; термограммы; черно-белые графики.

A.E. Kolodenkova, S.S. Vereshchagina**DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED APPROACH TO ELECTRICAL EQUIPMENT FAULT DETECTION USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS**

Electrical equipment (EE) is a key part of industrial electrical systems where unexpected mechanical failures in operation can cause serious consequences (disruption of the technological process, reduction in the quality and quantity of manufactured products and emergencies). For timely detection of such faults, as well as to ensure normal operation of the systems, it is required to conduct regular assessment of EE technical state using modern computer technologies under conditions of incomplete and fuzzy information. To solve this problem, we propose an approach using quantization and convolutional neural networks (CNNs) which differs from existing approaches by complex processing of thermograms obtained with a thermal imaging device; images with black-and-white and color graphs obtained from instruments or built based on statistical data. This approach provides an opportunity to improve the accuracy of classification of various EE malfunctions, reduce unscheduled equipment failures due to prompt decision-making regarding the EE technical state under conditions of incomplete and fuzzy information. The review of studies in this subject area by both Russian and foreign scientists reflects a number of successful experiments on the use of CNNs. The CNN developed to classify faults outputs a class number to which the current state of the equipment relates (class 1 – serviceable EE; class 2 – serviceable EE with small deviations). This paper considers a generalized scheme and algorithm of a complex approach to EE fault detection with their detailed description. The study results were obtained when diagnosing the asynchronous motor АИР63А4У1 and confirm the validity and objectivity of using the proposed approach.

Technical state of electrical equipment; convolutional neural network; classification; thermograms; black and white graphs.

Введение. Ни одна современная промышленность, включая нефтеперерабатывающую, авиационную, металлургическую и другие, не обходится без использования электрооборудования (ЭО) (асинхронные двигатели, синхронные генераторы, трансформаторы), преждевременный выход из строя либо отказ которых может вызвать различные уровни повреждений оборудования [1–4]. В большинстве случаев это происходит из-за дефектов изоляции, изменений параметров качества электрической энергии, износа деталей, а также нарушения правил технической эксплуатации.

Диагностирование и ремонт ЭО занимает много времени, а внезапная остановка работы или повреждение обычно приводит к огромным экономическим потерям [5, 6]. Ввиду важности этой проблемы было разработано российскими и зарубежными учеными большое количество подходов и методов диагностирования ЭО с применением различных технологий.

Например, в работе [7] для проведения профилактической диагностики масляных силовых трансформаторов предлагается метод, основанный на хроматографическом анализе растворенных газов (*Dissolved Gas Analysis (DGA)*) в масле. Авторами также была разработана нечеткая логическая модель с применением метода *Key Gas*.

В работе [8] для диагностики начальных неисправностей силовых трансформаторов предлагается интеллектуальный бинарный многоступенчатый метод классификации неисправностей силовых трансформаторов, основанный на селективно гибридизированных традиционных методах анализа растворенных газов (*DGA*). Авторами также разработана гибридная модель диагностики начальных неисправностей, в которой для каждого конкретного этапа классификации выбираются наиболее точные из бинарных классификаторов *ANN* на основе *DGA*. Этапы классификации начинаются с установления наличия или отсутствия неисправности и заканчиваются определением типа и серьезности неисправности на более поздних этапах.

В работе [9] предлагается диагностирование неисправностей подшипника трехфазного асинхронного двигателя осуществлять с использованием спектральных характеристик тока статора и алгоритмов машинного обучения. Для диагностирования неисправностей применялся метод опорных векторов, использующий в качестве характеристик частотные компоненты боковой полосы тока нагрузки.

Однако из часто встречающихся в последнее время инструментов для диагностирования ЭО, а именно оценивания состояния ЭО, являются тепловизионные устройства, результатом которых являются термограммы, и преимуществами применения которых являются быстрое проведение исследования без непосредственного контакта с оборудованием и исключение человеческого фактора.

Например, в работе [10] предлагается новая методология диагностики для обнаружения механических и электрических неисправностей в асинхронном двигателе, основанная на дискретном вейвлет-преобразовании с облегченной одномерной архитектурой СНС. Представленное исследование было разработано с использованием сигналов тока, полученных от статоров двигателя.

В работе [11] рассматривается оптимизированная диагностика межвитковых коротких замыканий для асинхронных двигателей с использованием нейронной сети *LeLeRU* с функцией активации *ReLU*. Это приводит к тому, что для обнаружения неисправностей не требуются дополнительные датчики или оборудование.

В работе [12] рассматривается диагностика неисправностей трехфазного асинхронного двигателя с использованием СНС с конфигурацией входных данных векторного подхода *Park*. Предложен метод предварительной обработки, который изменяет изображение с использованием векторного подхода и преобразует его во входное изображение.

Несмотря на большое количество работ в данной области, вопрос диагностирования неисправностей ЭО с помощью тепловизионной диагностики остается открытым. Это связано с тем, что разработанные методы имеют ограничения применения их на практике, поскольку привязаны к конкретным ЭО.

1. Алгоритм работы комплексного подхода. Инфракрасная тепловизионная съемка очень подходит для обнаружения неисправностей в ЭО, поскольку позволяет диагностировать его при непрерывной работе. Получая и анализируя информацию о температу-

ре, распределенной по поверхности оборудования, можно найти локальные места, которым нанесен ущерб, и сделать вывод о тяжести ущерба. При этом, если тепловое изображение не может быть полностью оценено персоналом, то его можно использовать для определения необходимости дальнейшего диагностирования ЭО.

Обобщенная схема обнаружения неисправностей ЭО с использованием СНС состоит из четырех основных этапов:

Этап 1. Сбор исходных данных. Данные могут поступать в виде цветных изображений (термограмм), полученных с помощью тепловизионного устройства; изображений с черно-белыми или цветными графиками, характеризующих изменения значений различных параметров во времени, построенных по данным, поступающих с датчиков, хранящихся в *Excel* формате.

Этап 2. Обработка исходных данных. С помощью известных методов [13–16] осуществляется перевод цветного изображения в черно-белое, а также преобразование черно-белого графика (квантование изображения) [17–20]. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому перед выбором и применением метода целесообразно обращать внимание на предметную область, а также качество изображения.

После преобразования проводится процедура очистки от полутонов, тем самым СНС будет работать более эффективно.

Здесь же загруженное изображение при необходимости корректируется: поворачивается изображение, обрезаются поля, тем самым при обработке СНС будет работать более эффективно.

Изображения, полученные с помощью тепловизора, могут быть смещены относительно оси координат. Это может быть связано с тем, что проводилась ручная съемка, при которой выровнять прибор в идеал невозможно, а треногу использовать не позволяли условия. В связи с этим возникает необходимость корректировки ориентации изображения в пространстве, чтобы нейронная сеть верно интерпретировала изображение и выдавала результат.

Операция обрезки необходима как для изображений, так и для изображений с черно-белыми или цветными графиками.

Первоначально изображения с графиками могут содержать поля, которые не целесообразно обрабатывать с помощью нейронной сети, так как они не содержат данные для обработки. Если же их не обрезать, то увеличивается время обработки, которое ничем не обосновано, поскольку обрабатывается область, которая не содержит данных для анализа.

Полученные графики могут содержать полутона (затемненные участки, тень и др.), которые будут мешать нейронной сети для верного интерпретирования данных, а также выдачи корректного результата.

Отметим, что на данном этапе важен перевод графика к упрощенному виду – графики должны быть представлены в определенной размерности изображения и в ступенчатом виде. На рис. 1 и 2 изображены примеры графиков напряжений. Работа с графиками ступенчатого вида делает обучение СНС проще, а потери в информации незначительны, именно этим обусловлено такое решение.

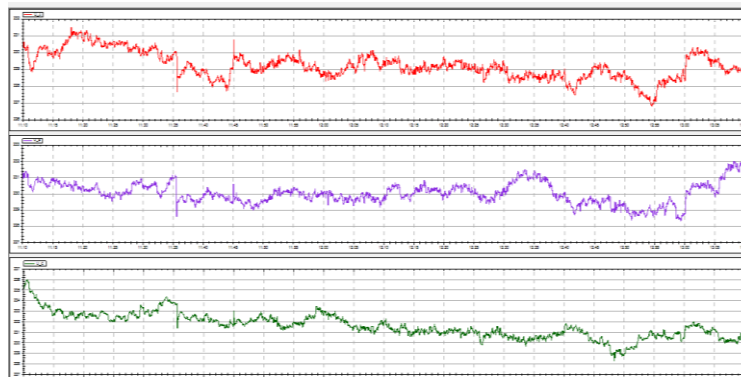


Рис. 1. График напряжений до приведения к ступенчатому виду

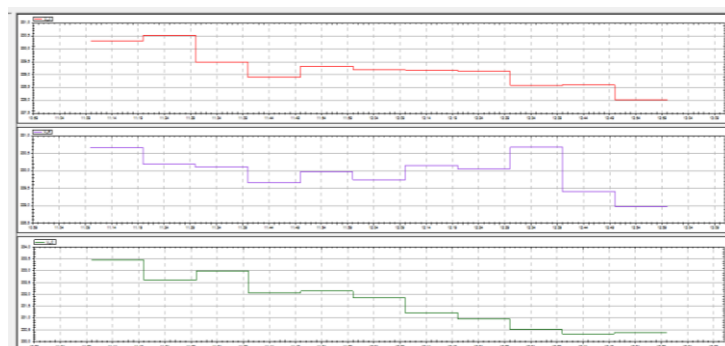


Рис. 2. График напряжений, приведенный к ступенчатому виду

Этап 3. Построение СНС и ее обучение. Обучение СНС осуществляется с использованием базы данных (БД). В БД хранятся: цветные изображения, термограммы, статистическая информация, по которой строятся графики зависимости значений параметра от времени с учетом выбора условия (дата, время) и изображения с черно-белыми или цветными графиками.

Сверточная нейронная сеть распознавания термограмм необходима для определения предельных или аномальных температур, которые проводятся бесконтактно в режиме реального времени во время работы ЭО.

Сверточная нейронная сеть распознавания цветных изображений необходима для выявления контуров частей оборудования с температурой, которая выходит за пределы допустимого.

Сверточная нейронная сеть распознавания изображений с черно-белыми графиками необходима для выявления параметров, которые выходят за пределы допустимого, с определением времени отклонения и значения параметра.

Сверточная нейронная сеть распознавания изображений с черно-белыми графиками необходима для определения неисправностей ЭО. Отметим, что черно-белые графики, построенные по значениям параметров ЭО, используются в случае, если нет термограмм либо они плохого качества.

Этап 4. Принятие решений. По распознанным данным осуществляется классификация технического состояния ЭО.

На рис. 3 представлен алгоритм комплексного подхода к обнаружению неисправностей ЭО, состоящий из восьми шагов.



Рис. 3. Алгоритм комплексного подхода к обнаружению неисправностей электрооборудования

Шаг 1. Сбор данных.

Шаг 2. Если на входе термограмма, то переход к шагу 7, иначе переход к шагу 3.

Шаг 3. Если на входе цветное изображение, то переход к шагу 4, иначе переход к шагу 5.

Шаг 4. Осуществляется перевод цветного изображения в черно-белое изображение.

Шаг 5. Построение графиков по значениям параметров.

Шаг 6. Преобразование изображения с черно-белым графиком. В данном случае используется квантование изображения, непрерывный динамический диапазон значений яркости делится на ряд дискретных уровней, используя квантователь Ллойда-Макса.

Шаг 7. Построение СНС и их обучение.

Шаг 8. Принятие решений относительно технического состояния ЭО.

2. Описание набора исходных данных. База данных содержит термограммы (изображения), полученные с помощью тепловизора *Testo 875-li*, температурной чувствительностью (*NETD*) < 0,05°C при 30°C, рабочей температурой от –15 до – 40°C.

Съемка тепловизором проводилась в весеннее, летнее, осеннее время года при различных климатических условиях (дождь, град, солнце, пасмурно). База термограмм содержит 143 изображений, в расширении *.bmt*, которые содержат реальное изображение и термограмму, размером 640x480 пикселей. Также БД содержала 300 изображений с черно-белыми и цветными графиками.

Данные имеют два класса, соответствующие текущему состоянию ЭО: класс 1 – работоспособное ЭО; класс 2 – работоспособное ЭО с небольшими отклонениями. В зависимости от класса выдается перечень мероприятий, направленных на предупреждения выхода ЭО из строя.

При диагностировании ЭО с использованием термограмм может возникнуть дисбаланс объектов в классах исходных данных. Это обусловлено тем, что на термограммах могут как присутствовать, так и отсутствовать различные неисправности (дефекты) оборудования.

В этом случае для оценки качества СНС использовалась точность:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP},$$

где *TP* (*True Positive*) – истинноположительный результат (исправность распознана как исправность); *FP* (*False Positive*) – ложноположительный результат (исправность, распознана как неисправность).

Для предобработки предъявляются следующие требования к изображениям:

- ◆ размерность изображения должна быть 640x480;
- ◆ ориентация изображения – оси координат должны начинать отсчет из левого нижнего угла изображения и должны быть параллельны границам изображения;
- ◆ в границы изображения должны входить только оси координат и сам график;
- ◆ цвет изображения – черно-белый (прошедший бинаризацию);
- ◆ на изображении должны отсутствовать какие-либо искажения графика и лишние элементы;
- ◆ графики изменения параметров во времени должны иметь ступенчатый вид.

3. Результаты исследования. Результаты исследования получены при диагностировании асинхронного двигателя АИР63А4У1 на основе термограмм и изображений с черно-белыми графиками.

Для разработки СНС распознавания термограмм была использована библиотека *TensorFlow* языка программирования *Python*. Использовалась архитектура *LeNet* от Я. Лекуна, применялась функция активации – *ReLU*. Тестовая выборка составляла 20%, а обучающая выборка 80% от всего объема изображений. После обучения СНС была проведена оценка с помощью тестового набора. Точность составила 96,2%, *F1* – 95,4%.

На рис. 4 представлены графики точности и потерь сверточной нейронной сети при распознавании термограмм.

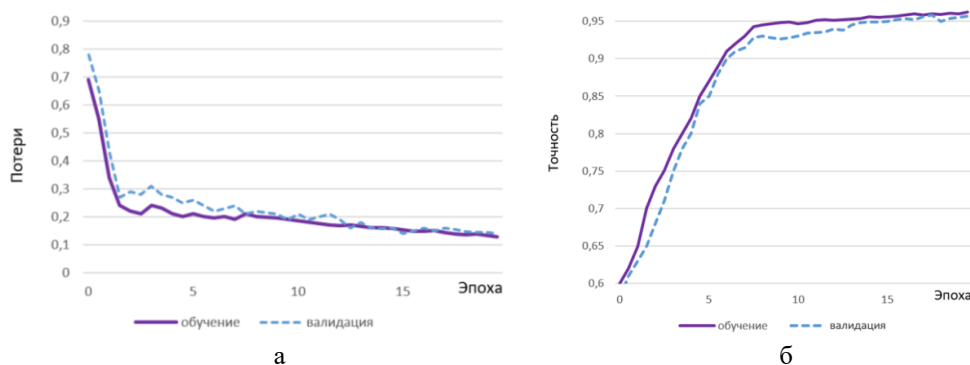


Рис. 4. График точности (а) и потерь (б) сверточной нейронной сети при распознавании термограмм: 1 – обучение; 2 – валидация

Полученная точность СНС распознавания термограмм составила 96,2 %, ЭО работоспособно, но с небольшими отклонениями.

Проанализировав термограммы, была выявлена повышенная температура на корпусе асинхронного двигателя, что характерно для перегрева обмоток. В связи с этим были рекомендованы следующие мероприятия: 1) проанализировать коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности; 2) проанализировать коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности; 3) проанализировать несимметрию напряжения.

Для разработки СНС распознавания черно-белых изображений были использованы библиотеки *TensorFlow* и *Keras*. Для разработки настольного приложения выбрана библиотека *Tkinter* языка программирования *Python*, архитектура СНС *VGG16*.

Для адаптирования архитектуры СНС *VGG16* под задачу потребовались изменения, результат которых представлен ниже:

1) на вход подается изображение размерностью 128x256x1, поскольку поступают только черно-белые изображения за продолжительные промежутки времени, из чего следует прямоугольный вид изображений;

2) сверточные слои имеют следующие значения размерности и число фильтров:

- слои *Conv1-1* и *Conv1-2* – 256x128x32 вместо 224x224x64;
- слои *Conv2-1* и *Conv2-2* – 128x64x64 вместо 112x112x128;
- слои *Conv3-1*, *Conv3-2* и *Conv3-3* – 64x32x128 вместо 56x56x256;
- слои *Conv4-1*, *Conv4-2* и *Conv4-3* – 32x16x256 вместо 28x28x256;
- слои *Conv5-1*, *Conv5-2* и *Conv5-3* – 16x8x256 вместо 14x14x512;

3) результирующий тензор имеет размеры 4x8x256 и подается на полносвязную нейронную сеть с 1024 нейронами двух скрытых слоев и двумя нейронами выходного слоя;

4) помимо слоя *MaxPooling* в архитектуру СНС включен слой *Dropout*, предназначенный для предотвращения возможного переобучения сети.

На рис. 5 представлены графики точности и потерь сверточной нейронной сети при распознавании черно-белых изображений.

Точность на основе тестовой выборки составила 94,33 %.

Был проведен сравнительный анализ точности нейронных сетей: разработанная нейронная сеть – 94,33%; *AlexNet* – 93,7%, *ResNet* – 94,15%.

Сравнивая результаты обучения предложенной модели и моделей предварительно обученных нейронных сетей, можно сделать вывод о высоком качестве разработанной модели и эффективности предложенного подхода.

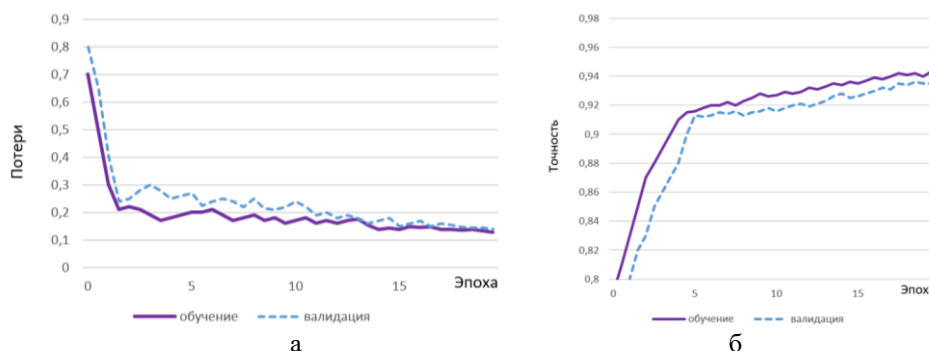


Рис. 5. График точности (а) и потерь (б) сверточной нейронной сети при распознавании черно-белых изображений: 1 – обучение; 2 – валидация

Заключение. В работе предлагается подход к выявлению неисправностей ЭО на основе комплексной обработки термограмм, графиков и цветных изображений. Это позволяет ускорить процесс принятия решений относительно технического состояния ЭО, повысить точность классификация изображений и избежать вмешательства человеческого фактора. При этом для изображений с цветными графиками учитывается различная теплопроводность материалов (корпус – сталь; обмотки – медь и т.д.). Предлагаемый подход может служить эффективным средством поддержки принятия решений при диагностировании любого ЭО с целью выявления неисправностей.

Работа выполнена при поддержке РНФ № 23-29-00415.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cheng Li, Zixuan Yu, Mingsong Zhuo Research on fault detection method of infrared thermal imaging for power equipment based on deep learning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 714. – P. 1-9. – DOI: 10.1088/1755-1315/714/4/0420 45.
2. Wang W., He Y., Han X., Li Y. Functional failure diagnosis method of manufacturing system based on dynamic Bayesian network // International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control. – 2020. – P. 93-97. – DOI: 10.1109/SDPC49476.2020. 9353184.
3. Чернова А.Д., Косенко А.А. Автоматизация распознавания дефектов оборудования электрических сетей с помощью искусственных нейронных сетей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 62-71. – DOI: 10.14529/power230306.
4. Колоденкова А.Е., Верецагина С.С., Фаворская Е.А., Осипова Е.А. Разработка метода оценки технического состояния электрооборудования с использованием взвешенных нечётких правил // Онтология проектирования. – 2024. – Т. 14, № 1 (51). – С. 134-144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
5. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Проблемы изношенного электрооборудования в современной энергетике // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 7 (38). – С. 89-91.
6. Грабчак Е.П., Грабчак Э.П., Логинов Е.Л., Романова Ю.А. Проблемы замены изношенного оборудования в электроэнергетике России: приоритеты модернизации в контексте обеспечения надежности и безопасности // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – С. 38-43. – DOI: 10.36535/0869-4176-2019-05-5.
7. Vakhnina V.V., Markov E.V. Developing fuzzy model using the key gas method to determine the defects occurring in oil power transformers // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – 2024. – P. 451-455. – DOI: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553816.
8. Jan B., Parveen S., Khan S.A. ANN based multi-stage binary classification technique for incipient fault diagnosis of oil immersed transformer // International Conference on Industry 4.0 Technology (I4Tech). – 2022. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/I4Tech55392.2022. 9952593.
9. Yatsugi K., Kone S.E.M.P., Mizuno Y. Faulty class diagnosis of three phase induction motor bearing using stator current spectral features and machine learning algorithms // 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. – 2022. – P. 112-117. – DOI: 10.23919/CMD54214.2022. 9991672.

10. Jiménez-Guarneros M., Morales-Perez C., Rangel-Magdaleno J.d.J. Diagnostic of combined mechanical and electrical faults in ASD-powered induction motor using MODWT and a lightweight 1-D CNN // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2022. – Vol. 18, No. 7. – P. 4688-4697. – DOI: 10.1109/TII.2021. 3120975.
11. Gaber I.M., Shalash O., Hamad M.S. Optimized inter-turn short circuit fault diagnosis for induction motors using neural networks with LeLeRU // IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy. – 2023. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/CPERE56564. 2023.10119618.
12. Goh Y.-J. Fault Diagnostics of 3-phase Induction Motor using CNN with Park's Vector Approach Input Data Configuration // 10th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering. – 2024. – P. 234-239. – DOI: 10.1109/ICMRE60776.2024. 10532185.
13. Saxena Lalit Niblack's binarization method and its modifications to real-time applications: a review // Artificial Intelligence Review. – 2019. – P. 673-705.
14. Янковский А.А., Бугрий А.Н. Критерии выбора метода бинаризации при обработке изображений лабораторных анализов // АСУ и приборы автоматики. – 2010. – № 153. – С. 53-56.
15. Федоров А. Бинаризация черно-белых изображений: состояние и перспективы развития. – Режим доступа: <http://itclaim.ru/Library/Books/ITS/wwwbook/ist4b/its4/fyodorov.html/> (дата обращения: 15.07.2024).
16. Зотикова А.А., Иванова Е.А. Обзор алгоритмов компьютерного зрения // Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты. – 2023. – С. 436-439.
17. Пехота А.Н., Галушко В.Н., Громыко И.Л. Технология использования сверточных нейронных сетей при диагностике состояния трансформаторов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Фундаментальные науки. – 2021. – № 12. – С. 63-69.
18. Shah S., Tembhurne J. Object detection using convolutional neural networks and transformer-based models: a review // Journal of Electrical Systems and Inf. Technol. – 2023. – 10, 54. – <https://doi.org/10.1186/s43067-023-00123-z>.
19. Pandey S., Bharti J. Review of different binarization techniques used in different areas of image analysis // Evolution in Signal Processing and Telecommunication Networks: Proceedings of Sixth International Conference on Microelectronics, Electromagnetics and Telecommunications (ICMEET 2021), Vol. 2. – Singapore: Springer Singapore, 2022. – P. 249-268.
20. Kang H., Stamoulis I. Gaussian Image Binarization // International Journal of Image and Graphics. – 2021. – Vol. 21, No. 04. – P. 2150047.

REFERENCES

1. Cheng Li, Zixuan Yu, Mingsong Zhuo Research on fault detection method of infrared thermal imaging for power equipment based on deep learning, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 714, pp. 1-9. DOI: 10.1088/1755-1315/714/4/0420 45.
2. Wang W., He Y., Han X., Li Y. Functional failure diagnosis method of manufacturing system based on dynamic Bayesian network, *International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control*, 2020, pp. 93-97. DOI: 10.1109/SDPC49476.2020. 9353184.
3. Chernova A.D., Kosenko A.A. Avtomatizatsiya raspoznavaniya defektov oborudovaniya elektricheskikh setey s pomoshch'yu iskusstvennykh neyronnykh setey [Automatic defect recognition for electrical equipment with artificial neural networks], *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering], 2023, Vol. 23, No. 3, pp. 62-71. DOI: 10.14529/power230306.
4. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S., Favorskaya E.A., Osipova E.A. Razrabotka metoda otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya s ispol'zovaniem vzheshennykh nechetkikh pravil [An approach to assessing the technical condition of electrical equipment using weighted fuzzy rules], *Ontologiya proektirovaniya* [Ontology of designing], 2024, Vol. 14, No. 1 (51), pp. 134-144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
5. Sazykin V.G., Kudryakov A.G. Problemy iznoshennogo elektrooborudovaniya v sovremennoy energetike [Problems of worn-out electrical equipment in modern power engineering], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International scientific research journal], 2015, No. 7 (38), pp. 89-91.
6. Grabchak E.P., Grabchak E.P., Loginov E.L., Romanova Yu.A. Problemy zameny iznoshennogo oborudovaniya v elektroenergetike Rossii: priority modernizatsii v kontekste obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti [Problems of replacing worn-out equipment in the power industry of Russia: modernization priorities in the context of ensuring reliability and safety], *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Security and emergency issues], 2019, pp. 38-43. DOI: 10.36535/0869-4176-2019-05-5.

7. Vakhnina V.V., Markov E.V. Developing fuzzy model using the key gas method to determine the defects occurring in oil power transformers, *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, 2024, pp. 451-455. DOI: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553816.
8. Jan B., Parveen S., Khan S.A. ANN based multi-stage binary classification technique for incipient fault diagnosis of oil immersed transformer, *International Conference on Industry 4.0 Technology (I4Tech)*, 2022, pp. 1-6. DOI: 10.1109/I4Tech55392.2022. 9952593.
9. Yatsugi K., Kone S.E.M.P., Mizuno Y. Faulty class diagnosis of three phase induction motor bearing using stator current spectral features and machine learning algorithms, *9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2022, pp. 112-117. DOI: 10.23919/CMD54214.2022. 9991672.
10. Jiménez-Guarneros M., Morales-Perez C., Rangel-Magdaleno J.d.J. Diagnostic of combined mechanical and electrical faults in ASD-powered induction motor using MODWT and a lightweight 1-D CNN, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, Vol. 18, No. 7, pp. 4688-4697. DOI: 10.1109/TII.2021. 3120975.
11. Gaber I.M., Shalash O., Hamad M.S. Optimized inter-turn short circuit fault diagnosis for induction motors using neural networks with LeLeRU, *IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy*, 2023, pp. 1-5. DOI: 10.1109/CPERE56564. 2023.10119618.
12. Goh Y.-J. Fault Diagnostics of 3-phase Induction Motor using CNN with Park's Vector Approach Input Data Configuration, *10th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*, 2024, pp. 234-239. DOI: 10.1109/ICMRE60776.2024. 10532185.
13. Saxena Lalit Niblack's binarization method and its modifications to real-time applications: a review, *Artificial Intelligence Review*, 2019, pp. 673-705.
14. Yankovskiy A.A., Bugriy A.N. Kriterii vybora metoda binarizatsii pri obrabotke izobrazheniy laboratornykh analizov [Criteria for choosing the binarization method in image processing of laboratory analyses], *ASU i pribory avtomatiki* [Automatic control systems and automation devices], 2010, No. 153, pp. 53-56.
15. Fedorov A. Binarizatsiya cherno-belykh izobrazheniy: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Binarization of black and white images: status and development prospects]. Available at: <http://itclaim.ru/Library/Books/TTS/wwwbook/ist4b/its4/fyodorov.htm/> (accessed 15 July 2024).
16. Zotikova A.A., Ivanova E.A. Obzor algoritmov komp'yuternogo zreniya [Review of computer vision algorithms], *Tsifrovizatsiya ekonomiki: napravleniya, metody, instrument* [Digitalization of the economy: directions, methods, tools], 2023, pp. 436-439.
17. Pekhota A.N., Galushko V.N., Gromyko I.L. Tekhnologiya ispol'zovaniya svertochnykh neyronnykh setey pri diagnostike sostoyaniya transformatorov [Technology of using convolutional neural networks in diagnostics of the state of transformers], *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Fundamental'nye nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Series Fundamental Sciences], 2021, No. 12, pp. 63-69.
18. Shah S., Tembhurne J. Object detection using convolutional neural networks and transformer-based models: a review, *Journal of Electrical Systems and Inf. Technol.*, 2023, 10, 54. Available at: <https://doi.org/10.1186/s43067-023-00123-z>.
19. Pandey S., Bharti J. Review of different binarization techniques used in different areas of image analysis, *Evolution in Signal Processing and Telecommunication Networks: Proceedings of Sixth International Conference on Microelectronics, Electromagnetics and Telecommunications (ICMEET 2021)*, Vol. 2. Singapore: Springer Singapore, 2022, pp. 249-268.
20. Kang H., Stamoulis I. Gaussian Image Binarization, *International Journal of Image and Graphics*, 2021, Vol. 21, No. 04, pp. 2150047.

Колоденкова Анна Евгеньевна – Самарский государственный технический университет; e-mail: anna82_42@mail.ru; г. Самара, Россия; д.т.н.; доцент; профессор кафедры информатики и вычислительной техники.

Верещагина Светлана Сергеевна – Самарский государственный технический университет; e-mail: werechaginass@mail.ru; г. Самара, Россия; к.т.н.; доцент кафедры информатики и вычислительной техники.

Kolodenkova Anna Evgen'evna – Samara State Technical University; e-mail: anna82_42@mail.ru; Samara, Russia; dr. of eng. sc.; professor of the Department of Computer Science and Engineering.

Vereshchagina Svetlana Sergeevna – Samara State Technical University; e-mail: werechaginass@mail.ru; Samara, Russia; cand. of technical sciences; associate professor of the Department of Computer Science and Engineering.

В.А. Воронкин, Е.М. Баян, В.В. Петров

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ,
НА ИХ МОРФОЛОГИЮ**

Наноструктурированные материалы, особенно оксид цинка (ZnO), привлекают значительное внимание благодаря широкому спектру применений, включающих в себя, пьезоэлектрические устройства, газовые сенсоры и фотокатализ. В частности, наностержни ZnO, благодаря своей одномерной структуре, обладают высокой площадью поверхности и настраиваемой морфологией. В данной работе исследовано влияние различных условий синтеза на морфологию наностержней ZnO, сформированных методом химического осаждения. Изучено воздействие концентрации прекурсора оксида цинка и вспомогательных веществ в затравочном растворе, времени термической обработки и толщины затравочного слоя, диаметра затравочных центров, и типа подложки на морфологию наностержней ZnO. Установлено, что изменение концентрации гексаметилентетрамина (ГМТА) незначительно влияет на размеры наностержней, в то время как уменьшение концентрации затравочного раствора приводит к уменьшению их длины от 380 ± 28 нм до 247 ± 41 нм. Увеличение толщины затравочного слоя способствует увеличению размеров наноструктур и приводит к росту среднего диаметра стержней от 86 ± 12 нм до 102 ± 13 нм и длин от 356 ± 29 нм до 391 ± 46 нм. Уменьшение концентрации затравочного раствора приводит к уменьшению диаметров затравочных центров от 9 ± 1 нм до 7 ± 1 нм, а уменьшение времени термической обработки затравочного слоя, напротив, к их увеличению, что связано с неполным термическим разложением прекурсора. Горизонтальное расположение подложки подавляет вертикальный рост наностержней из-за активной нуклеации в объеме реакционного раствора и последующего осаждения наностержней на подложку. Вертикальное положение подложки способствует увеличению длины кристаллов. Полученные результаты предоставляют ценную информацию для направленного синтеза наностержней ZnO с заданными характеристиками для различных применений.

Оксид цинка; ZnO; метод химического осаждения; наноструктуры; наностержни; затравочный слой; золь-гель метод.

V.A. Voronkin, V.V. Petrov, E.M. Bayan

**THE INFLUENCE OF SYNTHESIS CONDITIONS ON THE MORPHOLOGY OF ZnO
NANORODS, OBTAINED BY CHEMICAL BATH DEPOSITION METHOD**

Nanostructured materials, particularly zinc oxide (ZnO), have attracted significant attention due to their wide range of applications, including piezoelectric devices, gas sensors, and photocatalysis. In particular, ZnO nanorods with their one-dimensional structure possess a high surface area and tunable morphology. This study investigates the effect of various synthesis conditions on the morphology of ZnO nanorods formed by chemical deposition. The impact of zinc oxide precursor concentration and auxiliary substances in the seeding solution, thermal treatment time, seed layer thickness, seed center diameter, and substrate type on the morphology of ZnO nanorods is examined. It is found that changing the concentration of hexamethylenetetramine (HMTA) has a minor effect on nanorod dimensions, while reducing the seeding solution concentration results in decreasing their length from 380 ± 28 nm to 247 ± 41 nm. Increasing the seed layer thickness promotes larger nanostructures and leads to an increase in average rod diameter from 86 ± 12 nm to 102 ± 13 nm and length from 356 ± 29 nm to 391 ± 46 nm. Reducing the seeding solution concentration decreases seed center diameters from 9 ± 1 nm to 7 ± 1 nm; conversely, reducing thermal treatment time increases them due to incomplete thermal decomposition of precursors. Horizontal positioning of substrates suppresses vertical growth due to active nucleation in bulk reaction solutions followed by deposition onto substrates; vertical positioning enhances crystal length instead. The obtained results provide valuable insights for directed synthesis of ZnO nanorods with specified characteristics for various applications.

Zinc Oxide; ZnO; chemical bath deposition method; CBD; nanostructures; nanorods; seed layer; sol-gel method.

1. Введение. Сегодня наноразмерные материалы привлекают к себе значительное внимание из-за их уникальных физических и химических свойств по сравнению с их объемными аналогами. Среди множества наноматериалов оксид цинка (ZnO) используется в

широком спектре приборов электронной техники, таких как солнечные элементы [1], пьезоэлектрические устройства [2], сенсоры газов [3], и фотокаталитические устройства [4]. Уникальность ZnO связана с его широкой шириной запрещенной зоны 3,37 эВ при комнатной температуре [5], большой энергией связи экситона (60 эВ) [6], биосовместимостью, химической стабильностью, возможностью получения в виде различных структур [7]. В частности, наностержни ZnO с их одномерной структурой предлагают превосходные свойства, связанные с высокой площадью поверхности, эффективным транспортом электронов и регулируемой морфологией.

ZnO наностержни могут быть получены различными методами, включая гидротермальный синтез [8], микро-эмульсионный метод [9], осаждение из газовой фазы [10], спрей-пиролиз [11] и метод химического осаждения (ХО) [12, 13]. Среди перечисленных методов ХО выделяется как простой, экономичный и универсальный подход, позволяющий контролировать размер, форму и направление роста наностержней ZnO. Суть данного метода заключается в растворении прекурсоров в жидкой фазе, обычно водном растворе и последующей их реакции при низких температурах, что приводит к образованию наностержней ZnO на заданной поверхности.

Морфология наностержней ZnO, полученных ХО, в значительной степени зависит от условий формирования, таких как концентрация прекурсора, температура раствора [14], pH [15], время осаждения [16, 17], природа подложки и наличие или отсутствие затравочного слоя [18, 19]. Определение степени влияния указанных факторов позволит нам направленно получать наноструктуры с требуемыми для реальных применений свойствами.

Несмотря на прогресс в синтезе наностержней ZnO с помощью химического осаждения, полное понимание взаимосвязи между технологическими режимами получения и морфологией наностержней всё ещё не достигнуто и требует к себе дальнейшего внимания.

Целью данной работы является исследование влияния технологических режимов получения на морфологию ZnO наностержней, полученных с помощью химического осаждения. В работе исследуется влияние концентрации прекурсора оксида цинка и вспомогательных веществ в затравочном растворе, толщины и времени термической обработки затравочного слоя, размера зародышевых центров, типа используемой подложки и её расположение во время формирования на размер, форму и направленность наностержней ZnO. Кроме этого, обсуждаются механизмы роста и факторы, определяющие морфологию наностержней ZnO. Полученные данные являются подспорьем для продолжения исследования возможности получения наностержней ZnO с заданными свойствами.

2. Экспериментальная часть. Наностержни оксида цинка получали на кремниевых (10x12x0,38 мм, КЭФ-4) и поликорковых (10x12x1 мм, ВК-1) подложках с помощью метода химического осаждения. В случае кремниевой подложки предварительно её поверхность очищали дистиллированной водой, этиловым спиртом и после погружали в разбавленный водный раствор 1:10 HF, после этого вновь промывали дистиллированной водой, в случае поликорковой – аналогично, но без использования раствора HF. Затем на подготовленную подложку наносили затравочный слой с помощью золь-гель метода. Для этого навески ацетата цинка двухводного ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – $\text{Zn}(\text{Ac})_2$) растворяли в этиловом спирте для получения затравочных растворов различной концентрации (0,005 М, 0,0025 М и 0,001 М), далее помещали на ультразвуковую баню на 30 минут при комнатной температуре. После чего наносили на поверхность подложки 30 мкл затравочного раствора и с помощью центрифугирования (1000 об/мин, 60 с) добивались равномерного распределения слоя. Затравочный слой наносили один или два раза, далее полученные подложки помещали в муфельную печь и после нагревания до 240 °С выдерживали 10 или 20 мин.

Для формирования наностержней методом химического осаждения подготавливали растворы 0,05 М нитрата цинка шестиводного ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и гексаметиленetetрамина (ГМТА) различной концентрации в дистиллированной воде в двух отдельных химических стаканах, после этого их помещали на водяную баню до достижения температуры 85 °С при помешивании. Затем приливали раствор ГМТА к $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (конечная концентрация после смешивания 25 ммоль $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и 25 или 50 ммоль ГМТА).

Известно, что концентрации реагирующих веществ изменяются со временем и реакционный раствор может «стареть», снижая тем самым соотношение $\text{Zn}^{2+}/\text{OH}^-$ в растворе [20]. К тому же, температура оказывает сильное влияние на кинетику процесса химического осаждения [21]. В связи со всем сказанным, после смешивания двух растворов, подложки сразу же помещали в реакционный раствор, закрепляя их вертикально или горизонтально. Условия формирования: 60 мин при 85 °С, температура поддерживалась постоянной с помощью термостатирования. По окончании формирования затравочного слоя подложки доставали, промывали дистиллированной водой и высушивали при 100 °С в сушильном шкафу.

Сформированные структуры ZnO исследовались с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе (Nova Nanolab 600, 10 кэВ), а их параметры были проанализированы методами статистической обработки, в том числе и с помощью нейросети «DLgram01», обученной распознаванию массивов объектов сферической формы [22], которая применялась для идентификации ЗЦ, поскольку те имели сферическую форму.

3. Результаты и обсуждение. Предполагаемые химические реакции [23], происходящие в случае образования затравочного слоя с помощью золь-гель метода:



На рис. 1,а-е показаны во вставках СЭМ-изображения затравочного слоя на кремниевой подложке, при различной концентрации $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,005 М, 0,0025 М и 0,001 М) и времени термической обработки (20 или 10 мин) при температуре 240 °С. Затравочный слой наносился один раз. Как видно, на поверхности подложки образуются затравочные центры (ЗЦ) сферической формы, которые впоследствии играют роль центров нуклеации для роста кристаллов ZnO.

На рис. 1,а-е показан результат статистической обработки СЭМ-изображений во вставках в виде гистограмм распределения диаметров затравочных центров. На рис. 2,а-в при уменьшении концентрации затравочного раствора наблюдается постепенное уменьшение среднего диаметра частиц, а именно: 9 ± 1 ; $8,5 \pm 0,8$; и 7 ± 1 нм, соответственно. Тогда как при уменьшении времени термической обработки с 20 до 10 мин в случае с (г-е), наоборот, наблюдается некоторое увеличение среднего диаметров частиц по сравнению с режимом формирования с большим временем, а именно: 20 ± 2 ; 16 ± 2 ; 15 ± 1 нм, соответственно. Это можно объяснить на основании вышеприведённого механизма реакции (1-3), поскольку известно, что ацетат цинка термически разлагается при $T = 237$ °С, то уменьшение времени термической обработки приводит к неполному разложению и к укрупнению образующихся частиц.

Рис. 1,ж показывает во вставке СЭМ-изображение затравочных центров на кремниевой подложке полученного из раствора 0,005 М $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при времени термической обработки 20 мин и 240 °С при условии повторного нанесения затравочного слоя и гистограмму распределения диаметров затравочных центров. Образуются затравочные центры сферической формы, имеющие средний диаметр 12 ± 1 нм. По сравнению с рис. 1,а наблюдается увеличение среднего размера частиц 12 ± 1 нм против 9 ± 1 нм.

Рис. 2 показывает СЭМ-изображения наностержней ZnO, сформированных методом химического осаждения на кремниевой (рис. 2,а,б) и поликоровой (рис. 2,в,г) подложке при $t = 60$ мин, $T = 85$ °С и различных концентрациях прекурсора. Затравочный слой на подложках был получен при условиях термической обработки 20 мин 240 °С и концентрации затравочного раствора 0,005 М $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при различной толщине нанесённого слоя. Подложки были погружены в реакционный раствор горизонтально. Во всех случаях образовывались кристаллы ZnO, имеющие форму «наностержней», видно, что рост кристаллов происходил как на поверхности подложки (отдельные смотрящие «вверх» стержни), так и в объёме раствора, что приводило к выпадению наностержней на подложку. На всех СЭМ видны процессы вторичной нуклеации, когда на поверхности уже образо-

вавшегося наностержня, начинает происходить рост новой структуры. Результатом этого стало образование ZnO стержней похожих на «эскимо». Из основания одного ZnO стержня начинает происходить рост более мелкого стержня или же двух отдельных стержней, растущих из одного зародышевого центра, но в противоположных направлениях, такой тип роста, например, может приводить к образованию структур ZnO типа наноцветка [24].

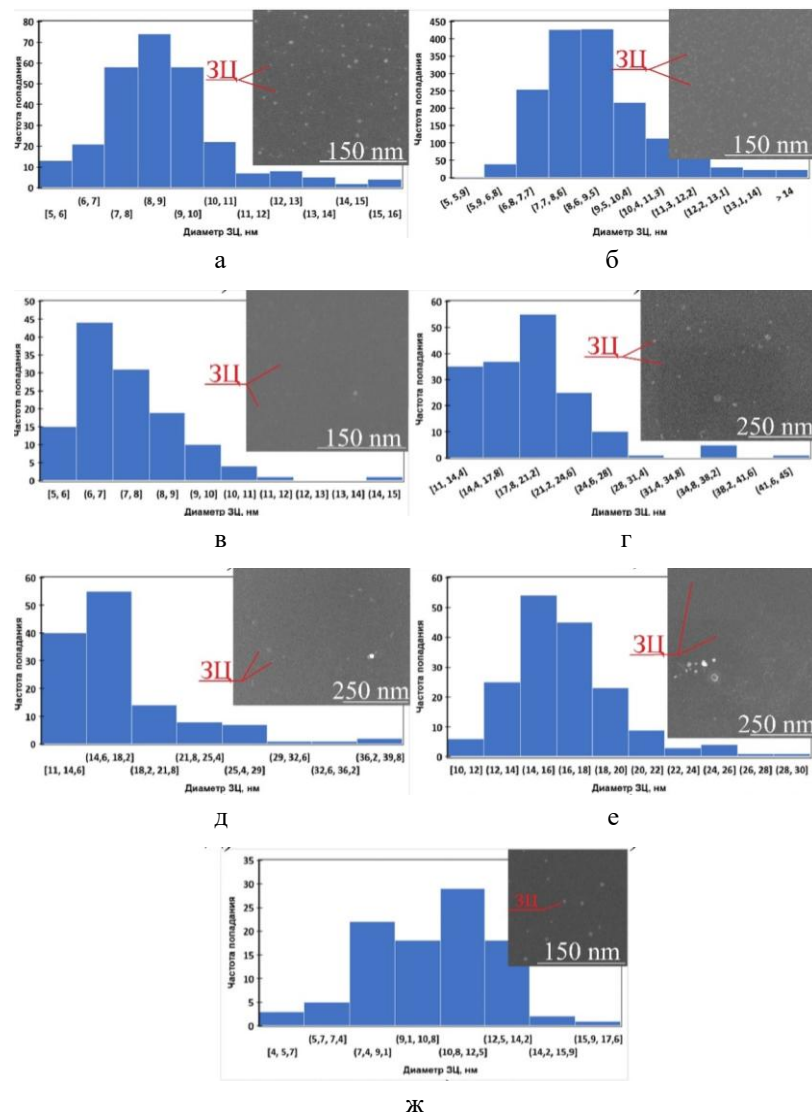
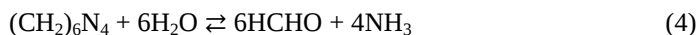


Рис. 1. СЭМ-изображения ЗЦ во вставках и гистограммы распределения размеров.

ЗЦ сформированы при различных условиях, затравочный слой нанесён один раз:

- а – 0,005 M Zn(Ac)₂, 20 мин; б – 0,0025 M Zn(Ac)₂, 20 мин; в – 0,001 M Zn(Ac)₂, 20 мин;
 г – 0,005 M Zn(Ac)₂, 10 мин; д – 0,0025 M Zn(Ac)₂, 10 мин; е – 0,001 M Zn(Ac)₂, 10 мин;
 затравочный слой нанесён два раза; ж – 0,005 M Zn(Ac)₂, 20 мин

Предполагаемые химические реакции [25], происходящие во время формирования кристаллов ZnO с помощью метода химического осаждения:



В соответствии с уравнениями реакций (4-6), можно предположить, что избыток ГМТА в растворе должен способствовать протеканию реакции и направленному росту образующихся структур ZnO.

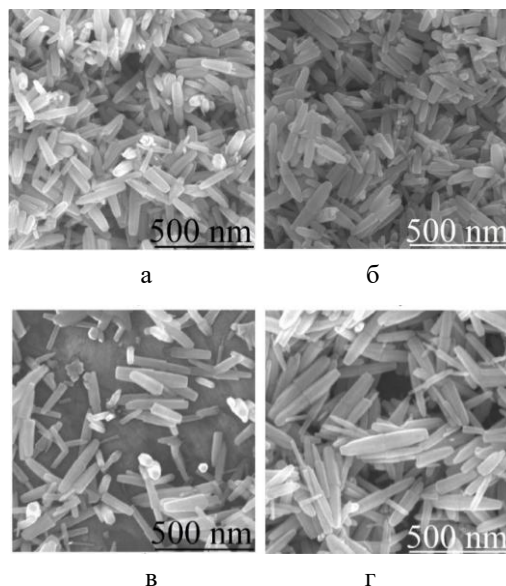


Рис. 2. СЭМ-изображения наностержней ZnO, сформированных методом химического осаждения, подложки расположены горизонтально, при следующих условиях:
а – Кремний; затравочный слой наносили один раз; $0,025\text{M Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0,05\text{M ГМТА}$;
б – Кремний; затравочный слой наносили два раза; $0,025\text{M Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0,05\text{M ГМТА}$;
в – Поликор; затравочный слой наносили один раз; $0,025\text{M Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0,025\text{M ГМТА}$;
г – Поликор; затравочный слой наносили два раза; $0,025\text{M Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0,025\text{M ГМТА}$

Рис. 3 показывает гистограммы, полученные на основании анализа СЭМ-изображений (рис. 2). Исходя из представленных данных видно, что повторное нанесение затравочного слоя приводит к среднему увеличению диаметра (d) и длины (l) формирующихся наностержней. Для сравнения: $d = 85 \pm 8$ нм, $l = 288 \pm 25$ нм для покрытий, полученных при нанесении затравочного слоя однократно (рис. 3,а,б), при двукратном нанесении затравочного слоя $d = 97 \pm 8$ нм, $l = 295 \pm 21$ нм (рис. 3,в-г). Так же было показано, что увеличение концентрации ГМТА не приводит к заметному увеличению параметров наностержней: $d = 86 \pm 12$ нм, $l = 356 \pm 29$ нм (рис. 3,д,е), против $d = 85 \pm 8$ нм, $l = 288 \pm 25$ нм (рис. 3,а,б) и $d = 103 \pm 13$ нм, $l = 391 \pm 46$ нм (рис. 3,ж,з), против $d = 97 \pm 8$ нм, $l = 295 \pm 21$ нм (рис. 3, в,г) и даже наоборот, при меньшей концентрации средние размеры получающихся наностержней были больше. Значительного влияния материала подложки на получаемые структуры обнаружено не было. Касательно полученных результатов о роли ГМТА, то они согласуются с имеющимися литературными данными, которые указывают на роль ГМТА в первую очередь как pH-буфера [20] или же хелатного агента [26], более современные исследования показывают, что ГМТА выполняет обе роли [27, 28]. Контроль pH и способствование началу роста по оси-с, однако при увеличении концентрации выше порогового значения, при котором начинает происходить образование ZnO наноструктур, скачкообразного роста размеров (диаметр, длина) не происходит, скорость роста остаётся примерно одинаковой. Тем не менее, согласно уже приведённому выше исследованию [27] при достаточно большой концентрации ГМТА начинает уменьшаться диаметр получаемых наноструктур оксида цинка, тогда как длина структур должна увеличиваться, за счёт подавления бокового роста, однако, в нашей работе этого эффекта не наблюдается. Скорее всего это вызвано горизонтальным расположением подложки в реакционном растворе, что препятствует вертикальному росту стержней.

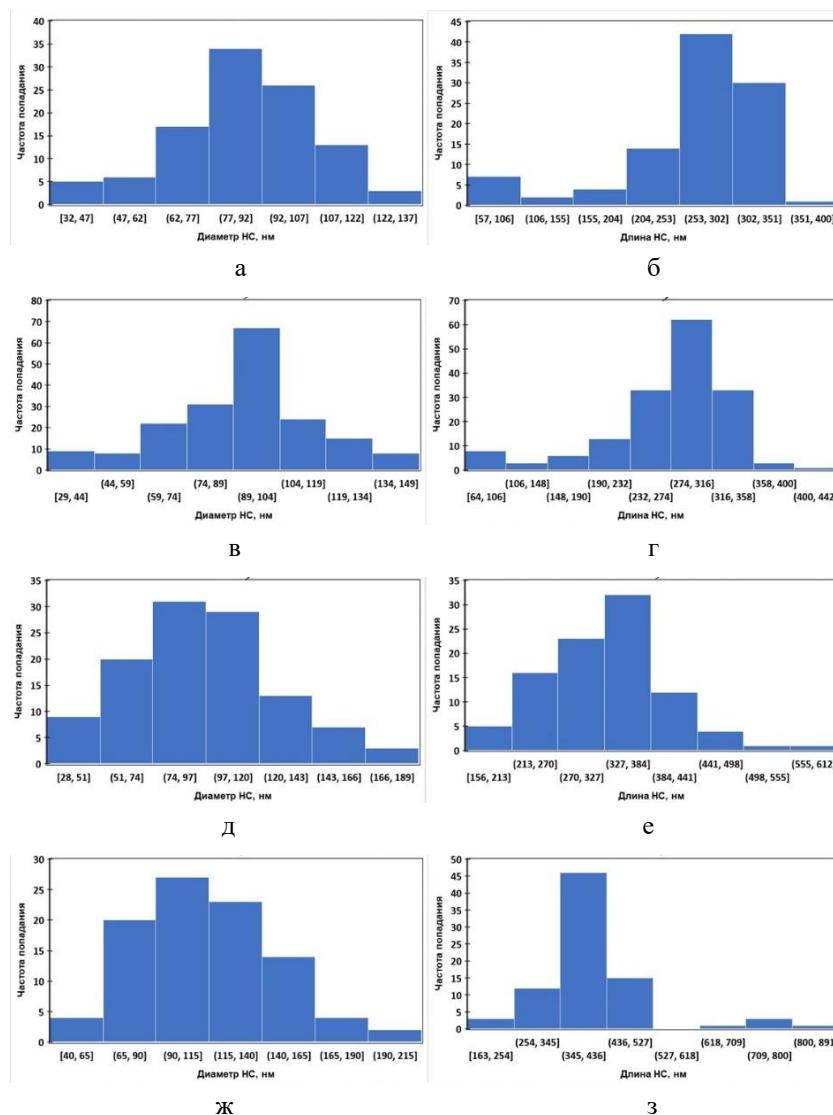


Рис. 4 показывает СЭМ-изображения наностержней на кремниевых подложках, полученных методом химического осаждения при $t = 60$ мин, $T = 85$ °C и концентрациях прекурсоров $0,025M$ $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ $0,025M$ ГМТА. Затравочный слой на подложках был получен при условиях термической обработки 20 мин 240 °C при одинаковой толщине затравочного слоя и различной концентрации затравочного раствора. Подложки расположены вертикально, что препятствует оседанию наностержней из объема раствора на поверхность подложки. Во всех случаях образовались структуры типа наностержней. Как и в случае с рис. 4 видны признаки вторичной нуклеации, однако заметно больше стержней, растущих вертикально.

Рис. 5 показывает гистограмму распределения диаметров и длин образцов из рис. 4. Глядя на результаты анализа, можно сказать, что уменьшение концентрации затравочного раствора приводит к заметному уменьшению длин наностержней $l = 380 \pm 28$ нм (рис. 5,а), $l = 363 \pm 38$ нм (рис. 5,б), $l = 247 \pm 41$ нм (рис. 5,в), тогда как диаметры остаются примерно в схожих диапазонах. Стоит заметить, что в данном случае наблюдается эффект увеличения длины наноструктуры, вызываемый присутствием ГМТА, чего не происходило в случае горизонтального расположения подложек.

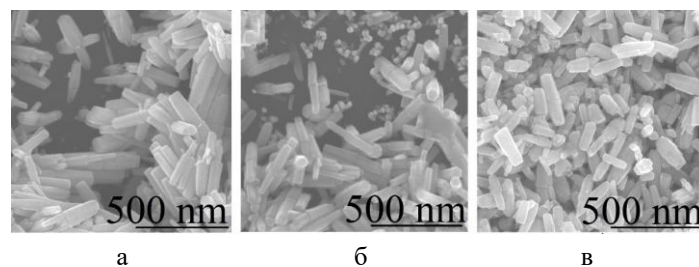


Рис. 4. СЭМ-изображения наностержней полученных методом химического осаждения, кремниевые подложки расположены вертикально, при следующих условиях:

а – 0,005M $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; б – 0,0025M $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
в – 0,001M $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

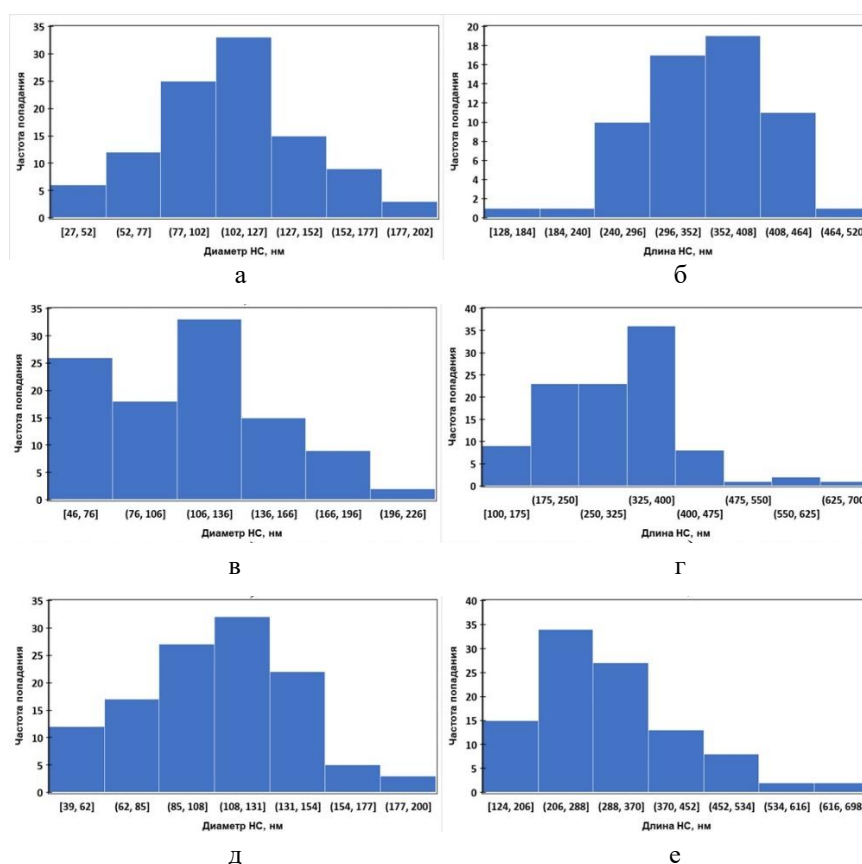


Рис. 5. Гистограммы распределения диаметров и длин наностержней полученных методом химического осаждения, кремниевые подложки расположены вертикально

Выводы. Были рассмотрены факторы, влияющие на размеры зародышевых центров. Уменьшение концентрации затравочного раствора с 0,005 М до 0,001 М приводит к уменьшению диаметров на 25 % от 9 ± 1 нм до 7 ± 1 нм. Уменьшение же времени термической обработки с 20 мин до 10 мин приводит, наоборот, к увеличению на 123 % диаметра затравочных центров от 9 ± 1 нм до 20 ± 2 нм, что объясняется неполным термическим разложением прекурсора.

Были установлены факторы, влияющие на морфологию наностержней, получаемых с помощью метода химического осаждения. Так, увеличение концентрации ГМТА не приводило к заметному изменению размеров наностержней, но изменение концентрации

затравочного раствора с 0,005 М до 0,001 М приводило к уменьшению на 42 % длины получаемых наностержней от 380 ± 28 нм до 247 ± 41 нм. Показано, что увеличение количества слоёв наносимого затравочного слоя (при этом на 39 % увеличивается размер ЗЦ от 9 ± 1 нм до 10 ± 3 нм) приводит к увеличению на 22 % диаметров наноструктур от 86 ± 12 нм до 103 ± 13 нм и на 14 % длин от 356 ± 29 нм до 391 ± 46 нм, тогда как значительного влияния типа используемой для синтеза подложки обнаружено не было. При горизонтальном расположении подложки длина наностержней составляла 356 ± 29 нм. Однако такое расположение препятствует вертикальному росту наностержней, поскольку в объёме реакционного раствора так же происходит активная нуклеация, в связи с чем происходит выпадение наностержней из раствора на подложку. При вертикальном положении длина кристаллов повышалась на 16 % до 380 ± 28 нм. Таким образом, были рассмотрены факторы, оказывающие влияние на характеристики наностержней ZnO. Полученная информация может послужить опорой для дальнейшего развития формирования наностержней ZnO с необходимыми характеристиками.

Выражаем благодарность сотрудникам Научно-исследовательской лаборатории технологии функциональных наноматериалов ИНЭП ЮФУ за помощь в анализе образцов методом СЭМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chen W. et al.* A new photoanode architecture of dye sensitized solar cell based on ZnO nanotetrapods with no need for calcinations // *Electrochemistry Communications*. – 2009. – Vol. 11, No. 5. – P. 1057-1060.
2. *Choi M.Y. et al.* Mechanically powered transparent flexible charge-generating nanodevices with piezoelectric ZnO nanorods // *Advanced Materials*. – 2009. – Vol. 21, No. 21. – P. 2185-2189.
3. *Guo J. et al.* High-performance gas sensor based on ZnO nanowires functionalized by Au nanoparticles // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2014. – Vol. 199. – P. 339-345.
4. *Zhang X. et al.* Effect of aspect ratio and surface defects on the photocatalytic activity of ZnO nanorods // *Scientific reports*. – 2014. – Vol. 4, No. 1. – P. 4596.
5. *Mang A. et al.* Band gaps, crystal-field splitting, spin-orbit coupling, and exciton binding energies in ZnO under hydrostatic pressure // *Solid state communications*. – 1995. – Vol. 94, No. 4. – P. 251-254.
6. *Thomas D.G.* The exciton spectrum of zinc oxide // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 1960. – Vol. 15, No. 1-2. – P. 86-96.
7. *Beermann N., Vayssieres L., Lindquist S.-E., Hagfeldt A.J.* Photoelectrochemical studies of oriented nanorod thin films of hematite // *J. Electrochem. Soc.* – 2000. – 147. – P. 2456-2461.
8. *Jiao M. et al.* On-chip hydrothermal growth of ZnO nanorods at low temperature for highly selective NO₂ gas sensor // *Materials Letters*. – 2016. – Vol. 169. – P. 231-235.
9. *Lim S.K. et al.* Preparation of ZnO nanorods by microemulsion synthesis and their application as a CO gas sensor // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2011. – Vol. 160, No. 1. – P. 94-98.
10. *Kumar S., Sahare P.D., Kumar S.* Optimization of the CVD parameters for ZnO nanorods growth: Its photoluminescence and field emission properties // *Materials Research Bulletin*. – 2018. – Vol. 105. – P. 237-245.
11. *Shinde S.D. et al.* Synthesis of ZnO nanorods by spray pyrolysis for H₂S gas sensor // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2012. – Vol. 528. – P. 109-114.
12. *Cao B., Cai W.* From ZnO nanorods to nanoplates: chemical bath deposition growth and surface-related emissions // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2008. – Vol. 112, No. 3. – P. 680-685.
13. *Yi S.H. et al.* Low-temperature growth of ZnO nanorods by chemical bath deposition // *Journal of colloid and interface science*. – 2007. – Vol. 313, No. 2. – P. 705-710.
14. *Abdulrahman A.F. et al.* Effect of growth temperature on morphological, structural, and optical properties of ZnO nanorods using modified chemical bath deposition method // *Journal of Electronic Materials*. – 2021. – Vol. 50, No. 3. – P. 1482-1495.
15. *Gawali S.A. et al.* Synthesis of zinc oxide nanorods from chemical bath deposition at different pH solutions and impact on their surface properties // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 704. – P. 788-794.
16. *Rosli N., Halim M.M., Hashim M.R.* Effect of CBD growth times on the ZnO microrods prepared on macroporous silicon // *Applied Physics A*. – 2021. – Vol. 127, No. 9. – P. 712.
17. *Yulianto B. et al.* Enhancement of SO₂ gas sensing performance using ZnO nanorod thin films: The role of deposition time // *Journal of Materials Science*. – 2017. – Vol. 52. – P. 4543-4554.

18. *Poornajar M. et al.* Synthesis of ZnO nanorods via chemical bath deposition method: The effects of physicochemical factors // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42, No. 1. – P. 173-184.
19. *Yoon Y.C., Park K.S., Kim S.D.* Effects of low preheating temperature for ZnO seed layer deposited by sol-gel spin coating on the structural properties of hydrothermal ZnO nanorods // *Thin Solid Films*. – 2015. – Vol. 597. – P. 125-130.
20. *Ashfold M.N.R. et al.* The kinetics of the hydrothermal growth of ZnO nanostructures // *Thin Solid Films*. – 2007. – Vol. 515, No. 24. – P. 8679-8683.
21. *Govender K. et al.* Understanding the factors that govern the deposition and morphology of thin films of ZnO from aqueous solution // *Journal of Materials Chemistry*. – 2004. – Vol. 14, No. 16. – P. 2575-2591.
22. *Матвеев А.В., Маиуков М.Ю., Нартова А.В., Санькова Н.Н., Окунев А.Г.* Автоматический анализ изображений микроскопии с применением облачного сервиса DLgram01 // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 300-311.
23. *Andrade E. et al.* Growth, structure and optical characterization of high quality ZnO thin films obtained by spray pyrolysis // *Thin solid films*. – 1999. – Vol. 350, No. 1-2. – P. 192-202.
24. *Wang Y. et al.* Controllable synthesis of ZnO nanoflowers and their morphology-dependent photocatalytic activities // *Separation and Purification Technology*. – 2008. – Vol. 62, No. 3. – P. 727-732.
25. *Schmidt-Mende L., MacManus-Driscoll J.L.* ZnO-nanostructures, defects, and devices // *Materials today*. – 2007. – Vol. 10, No. 5. – P. 40-48.
26. *Sugunan A. et al.* Zinc oxide nanowires in chemical bath on seeded substrates: role of hexamine // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. – 2006. – Vol. 39. – P. 49-56.
27. *Parize R. et al.* Effects of hexamethylenetetramine on the nucleation and radial growth of ZnO nanowires by chemical bath deposition // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2016. – Vol. 120, No. 9. – P. 5242-5250.
28. *Strano V. et al.* Double role of HMTA in ZnO nanorods grown by chemical bath deposition // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2014. – Vol. 118, No. 48. – P. 28189-28195.

REFERENCES

1. *Chen W. et al.* A new photoanode architecture of dye sensitized solar cell based on ZnO nanotetrapods with no need for calcinations, *Electrochemistry Communications*, 2009, Vol. 11, No. 5, pp. 1057-1060.
2. *Choi M.Y. et al.* Mechanically powered transparent flexible charge-generating nanodevices with piezoelectric ZnO nanorods, *Advanced Materials*, 2009, Vol. 21, No. 21, pp. 2185-2189.
3. *Guo J. et al.* High-performance gas sensor based on ZnO nanowires functionalized by Au nanoparticles, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, Vol. 199, pp. 339-345.
4. *Zhang X. et al.* Effect of aspect ratio and surface defects on the photocatalytic activity of ZnO nanorods, *Scientific reports*, 2014, Vol. 4, No. 1, pp. 4596.
5. *Mang A. et al.* Band gaps, crystal-field splitting, spin-orbit coupling, and exciton binding energies in ZnO under hydrostatic pressure, *Solid state communications*, 1995, Vol. 94, No. 4, pp. 251-254.
6. *Thomas D.G.* The exciton spectrum of zinc oxide, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1960, Vol. 15, No. 1-2, pp. 86-96.
7. *Beermann N., Vayssieres L., Lindquist S.-E., Hagfeldt A.J.* Photoelectrochemical studies of oriented nanorod thin films of hematite, *J. Electrochem. Soc.*, 2000, 147, pp. 2456-2461.
8. *Jiao M. et al.* On-chip hydrothermal growth of ZnO nanorods at low temperature for highly selective NO₂ gas sensor, *Materials Letters*, 2016, Vol. 169, pp. 231-235.
9. *Lim S.K. et al.* Preparation of ZnO nanorods by microemulsion synthesis and their application as a CO gas sensor, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, Vol. 160, No. 1, pp. 94-98.
10. *Kumar S., Sahare P.D., Kumar S.* Optimization of the CVD parameters for ZnO nanorods growth: Its photoluminescence and field emission properties, *Materials Research Bulletin*, 2018, Vol. 105, pp. 237-245.
11. *Shinde S.D. et al.* Synthesis of ZnO nanorods by spray pyrolysis for H₂S gas sensor, *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, Vol. 528, pp. 109-114.
12. *Cao B., Cai W.* From ZnO nanorods to nanoplates: chemical bath deposition growth and surface-related emissions, *The Journal of Physical Chemistry C*, 2008, Vol. 112, No. 3, pp. 680-685.
13. *Yi S.H. et al.* Low-temperature growth of ZnO nanorods by chemical bath deposition, *Journal of colloid and interface science*, 2007, Vol. 313, No. 2, pp. 705-710.
14. *Abdulrahman A.F. et al.* Effect of growth temperature on morphological, structural, and optical properties of ZnO nanorods using modified chemical bath deposition method, *Journal of Electronic Materials*, 2021, Vol. 50, No. 3, pp. 1482-1495.

15. Gawali S.A. et al. Synthesis of zinc oxide nanorods from chemical bath deposition at different pH solutions and impact on their surface properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, Vol. 704, pp. 788-794.
16. Rosli N., Halim M.M., Hashim M.R. Effect of CBD growth times on the ZnO microrods prepared on macroporous silicon, *Applied Physics A*, 2021, Vol. 127, No. 9, pp. 712.
17. Yuliarto B. et al. Enhancement of SO₂ gas sensing performance using ZnO nanorod thin films: The role of deposition time, *Journal of Materials Science*, 2017, Vol. 52, pp. 4543-4554.
18. Poornajar M. et al. Synthesis of ZnO nanorods via chemical bath deposition method: The effects of physicochemical factors, *Ceramics International*, 2016, Vol. 42, No. 1, pp. 173-184.
19. Yoon Y.C., Park K.S., Kim S.D. Effects of low preheating temperature for ZnO seed layer deposited by sol-gel spin coating on the structural properties of hydrothermal ZnO nanorods, *Thin Solid Films*, 2015, Vol. 597, pp. 125-130.
20. Ashfold M.N.R. et al. The kinetics of the hydrothermal growth of ZnO nanostructures, *Thin Solid Films*, 2007, Vol. 515, No. 24, pp. 8679-8683.
21. Govender K. et al. Understanding the factors that govern the deposition and morphology of thin films of ZnO from aqueous solution, *Journal of Materials Chemistry*, 2004, Vol. 14, No. 16, pp. 2575-2591.
22. Matveev A.V., Mashukov M.Yu., Nartova A.V., San'kova N.N., Okunev A.G. Avtomaticheskii analiz izobrazheniy mikroskopii s primeneniem oblachnogo servisa DLgram01 [Automatic analysis of microscopy images using the DLgram01 cloud service], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physicochemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2021, Issue 13, pp. 300-311.
23. Andrade E. et al. Growth, structure and optical characterization of high quality ZnO thin films obtained by spray pyrolysis, *Thin solid films*, 1999, Vol. 350, No. 1-2, pp. 192-202.
24. Wang Y. et al. Controllable synthesis of ZnO nanoflowers and their morphology-dependent photocatalytic activities, *Separation and Purification Technology*, 2008, Vol. 62, No. 3, pp. 727-732.
25. Schmidt-Mende L., MacManus-Driscoll J.L. ZnO-nanostructures, defects, and devices, *Materials today*, 2007, Vol. 10, No. 5, pp. 40-48.
26. Sugunan A. et al. Zinc oxide nanowires in chemical bath on seeded substrates: role of hexamine, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2006, Vol. 39, pp. 49-56.
27. Parize R. et al. Effects of hexamethylenetetramine on the nucleation and radial growth of ZnO nanowires by chemical bath deposition, *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, Vol. 120, No. 9, pp. 5242-5250.
28. Strano V. et al. Double role of HMTA in ZnO nanorods grown by chemical bath deposition, *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014, Vol. 118, No. 48, pp. 28189-28195.

Воронкин Владислав Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: vlad_voronkin@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634361635; кафедра техносферной безопасности и химии; аспирант.

Баян Екатерина Михайловна – Южный федеральный университет; e-mail: ekbayan@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78632184000, доб. 11488; кафедра общей и неорганической химии; доцент.

Петров Виктор Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: vvpetrov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634361635; кафедра техносферной безопасности и химии; профессор.

Voronkin Vladislav Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: vlad_voronkin@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634361635; the Department of Technosphere Safety and Chemistry; postgraduate student.

Bayan Ekaterina Mikhailovna – Southern Federal University; e-mail: ekbayan@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78632184000, ext. 11488; the Department of General and Inorganic Chemistry; associate professor.

Petrov Victor Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: vvpetrov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634361635; the Department of Technosphere Safety and Chemistry; professor.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылки на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.