



№6-2024

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

№ 6 (242). 2024 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.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Сергеев Н.Е.; Сидоркина И.Г.; Стемпковский 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.

Ответственный за выпуск Клевцов С.И.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 28.12. 2024 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 25,6. Уч.-изд. л. – 17,9.

Заказ № 9823. 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, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

С. Сингх, А.В. Прибыльский КЛАССИФИКАЦИИ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ СЕТИ КОЛМОГорова-Арнольда.....	6
В.В. Курейчик, Ю.В. Балясова, В.В. Бова ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТРЕХМЕРНОЙ УПАКОВКИ ПРИ МОРСКИХ ГРУЗОПЕРЕВОЗКАХ.....	15
Е.А. Назаров, М.Е. Данилин, Е.Ю. Косенко АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ	29
К.О. Обухов, И.Ю. Квятковская, А.В. Морозов МЕТОД ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА	42
З.А. Понимаш, М.В. Потанин МЕТОД И АЛГОРИТМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ИЗ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ТРАНСФОРМЕР	52
Г.А. Хришкевич, Д.А. Андреев, Л.В. Мотайленко, Ю.В. Бруттан, О.Н. Тимофеева МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	65
К.М. Занин АЛГОРИТМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОФИЛИРОВАННОГО РЕФЛЕКТОРА ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	76
Е.В. Лищенко, Э.В. Мельник, А.С. Матвиенко, А.Ю. Будко МЕТОД ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНОЙ ГЕОПРИВЯЗКИ.....	85

РАЗДЕЛ II. АНАЛИЗ ДАННЫХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

В.В. Соловьев, А.Я. Номерчук, Р.К. Филатов СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЕЛЬТА-РОБОТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	97
А.А. Богнюков, Д.Ю. Зорькин, Е.Г. Шведов СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ	113
М.А. Георгиева, И.М. Першин МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ГИДРОЛИТОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ	121
Е.Р. Зяблова МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ ПОДХОДОВ	131
Ю.А. Кораблёв ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СХОДСТВА ОСТАВШЕГОСЯ ПОЛЕЗНОГО СРОКА СЛУЖБЫ.....	142
А.С. Маннаа, Г.В. Муратова РАЗРАБОТКА СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЯЖЕСТИ ОСТЕОАРТРИТА КОЛЕННОГО СУСТАВА.....	155

РАЗДЕЛ III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

В.М. Глушань, Л.А. Попов, А.А. Целых О РЕАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УМНОЖЕНИЯ МАТРИЦ БОЛЬШИХ РАЗМЕРНОСТЕЙ	164
Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, М.И. Бесхмельнов ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ	177
П.Г. Ермаков ЗАДАЧА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА НЕОБОРУДОВАННОГО ВЕРТОДРОМА	191
А.А. Хачатрян, Е.С. Брискин ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМИ ПРИВОДАМИ РОБОТА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	201
С.А. Смирнов, Н.Ю. Паротькин, В.В. Золотарев АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОЖНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ	209
В.Г. Жуков, С.В. Селигеев ГОСУДАРСТВЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ИМЕНОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ УПРАВЛЕНИЯ УЯЗВИМОСТЯМИ	218
А.А. Львов, Б.М. Кац, П.А. Львов, В.П. Мещанов, К.А. Саяпин АНАЛИЗАТОРЫ СВЧ-ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ МНОГОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ. ОБЗОР МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ОБЗОР)	230

РАЗДЕЛ IV. НАНОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Б.Г. Коноплев МОДЕЛЬ РЕКТЕННЫ НА ОСНОВЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ СОБИРАНИЯ СВЧ ЭНЕРГИИ ПРИ СВЕРХНИЗКИХ УРОВНЯХ МОЩНОСТИ	248
М.М. Мигалин, В.А. Обуховец ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОЛЬГИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ПОМОЩЬЮ ПЕЧАТНЫХ СТРУКТУР	257
В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, А.Ю. Головин, Д.С. Мироненко СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ БАТАРЕИ БПЛА С ФУНКЦИЯМИ БАЛАНСИРОВКИ НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ	267
Е.А. Лахина, Н.Е. Черненко, Н.А. Шандыба, С.В. Балакирев, М.С. Солодовник ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОТЖИГА ПОДЛОЖКИ GAAS(111) НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОУГЛУБЛЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ФОКУСИРОВАННЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ВРЕМЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ	273
А.В. Юдин, Ю.И. Юрасов, О.А. Беляк, П.С. Пляка, М.И. Толстунов ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМОЛ ДЛЯ DLP 3D ПЕЧАТИ С ДОБАВКАМИ ПОРОШКОВ Al_2O_3 И ЦТС-19	280

CONTENT

SECTION I. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

S. Singh, A.V. Pribylskiy ALGORITHM FOR CLASSIFICATION OF FIRE HAZARDOUS SITUATIONS BASED ON KOLMOGOROV-ARNOLD NETWORK.....	6
V.V. Kureichik, Y.V. Balyasova, V.V. Bova OVERVIEW AND ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL PACKAGING FOR MARINE CARGO TRANSPORTATION	16
E.A. Nazarov, M.E. Danilin, E.Y. Kosenko ALGORITHM FOR CONSTRUCTING THE ROUTE OF A ROBOTIC COMPLEX USING THE FUZZY LOGIC METHOD	30
K.O. Obukhov, I.Yu. Kvyatkovskaya, A.V. Morozov METHOD OF GENETIC PROGRAMMING FOR SOLVING THE PROBLEM OF OPERATIONAL SCHEDULE PLANNING OF DISCRETE PRODUCTION.....	42
Z.A. Ponimash M.V. Potanin METHOD AND ALGORITHM FOR EXTRACTING FEATURES FROM DIGITAL SIGNALS BASED ON NEURAL NETWORKS TRANSFORMER	53
G.A. Khrishkevich, D.A. Andreev, L.V. Motaylenko, I.V. Bruttan, O.N. Timofeeva THE TECHNIQUE OF AUTOMATED IMAGE RESTORATION USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS.....	65
K.M. Zanin AN ALGORITHM FOR FORMING A PROFILED REFLECTOR OF A REFLECTOR ANTENNA IN PROBLEMS OF ELECTRODYNAMIC MODELING	77
E.V. Lishchenko, E.V. Melnik, A. S. Matvienko, A.Yu. Budko METHOD OF MOVING OBJECT POSITIONING WITHOUT USING GLOBAL GEO-REFERENCED DATA.....	86

SECTION II. DATA ANALYSIS AND MODELING

V.V. Soloviev, A.Y. Nomerchuk, R.K. Filatov TRAJECTORY PLANNING SYSTEM FOR THE MOVEMENT OF A DELTA ROBOT FOR AGRICULTURAL PURPOSES	97
A.A. Bognyukov, D.Yu. Zorkin, E.G. Shvedov SYSTEM ANALYSIS AND MODELING OF QUEUE SYSTEMS.....	113
M.A. Georgieva, I.M. Pershin MATHEMATICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION ON HYDROLITHOSPHERIC PROCESSES.....	122
E.R. Zyablova MODELING OF SOCIAL INTERACTIONS BASED ON GRAPH APPROACHES.....	132
J.A. Korablev PREDICTION OF FAULTS IN TECHNICAL SYSTEMS BASED ON THE SIMILARITY MODEL OF THE REMAINING USEFUL LIFE	143
A.S. Manna G.V. Muratova DEVELOPMENT OF A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK TO ASSESS THE SEVERITY OF KNEE OSTEOARTHRITIS	156

SECTION III. COMPUTING AND INFORMATION MANAGEMENT SYSTEMS

V.M. Glushan, L.A. Popov, A.A. Tselykh ABOUT THE REAL POSSIBILITIES OF MODERN COMPUTING SYSTEMS FOR DISTRIBUTED MULTIPLICATION OF LARGE-DIMENSIONAL MATRICES.....	164
B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, M.I. Beskhmelnov DECENTRALIZED CONTROL OF A GROUP OF AUTONOMOUS MOBILE OBJECTS WHEN FORMING A TRAJECTORY OF MOVEMENT	177

P.G. Ermakov	
PROBLEM OF MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF SELECTION OF AN UNPREPARED HELIDROM	191
A.A. Khachatryan, E.S. Briskin	
FEATURES OF CONTROL OF LINEAR DRIVES OF A ROBOT WHEN ITS MOVEMENT ON A VERTICAL SURFACE	201
S.A. Smirnov, N.Yu. Parotkin, V.V. Zolotarev	
AUTOMATION OF THE USE OF FALSE COMPONENTS IN THE INFORMATION SYSTEM	210
V.G. Zhukov, S.V. Seligeev	
STATE REGULATION OF NAMING AND SOFTWARE IDENTIFICATION IN VULNERABILITY MANAGEMENT PROCESSES	219
A.A. L'vov, B.M. Kats, P.A. L'vov, V.P. Meschanov, K.A. Sayapin	
MICROWAVE CIRCUIT ANALYZERS ON A MULTI-PROBE MEASURING LINE. REVIEW OF SIGNAL PROCESSING METHODS, PROBLEMS AND PROSPECTS (REVIEW).....	230

SECTION IV. NANOTECHNOLOGY, ELECTRONICS AND RADIO ENGINEERING

B.G. Konoplev	
A RECTENNA MODEL BASED ON MOSFETS FOR MICROWAVE ENERGY HARVESTING AT ULTRA-LOW POWER LEVELS	248
M.M. Migalin, V.A. Obukhovets	
PCB SUBSTRATES CHARACTERISATION USING PRINTED STRUCTURES	257
V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, A.Y. Golovin, D.S. Mironenko	
WIRELESS UAV CHARGING SYSTEM WITH BATTERY BALANCING FUNCTIONALITY	267
E.A. Lakhina, N.E. Chernenko, N.A. Shandyba, S.V. Balakirev, M.S. Solodovnik	
INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ANNEALING MODES OF THE GAAS(111) SURFACE ON THE CHARACTERISTICS OF NANOHOLE FORMED BY FOCUSED ION BEAMS AT VARIOUS EXPOSURE TIMES	274
A.V. Yudin, Yu.I. Yurasov, O.A. Belyak, P.S. Plyaka, M.I. Tolstunov	
TECHNOLOGICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES OF RESINS FOR DLP 3D PRINTING WITH ADDITIVES OF Al_2O_3 AND CTS-19 POWDERS	280

Раздел I. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.942, 654.924.56

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-6-15

С. Сингх, А.В. Прибыльский

КЛАССИФИКАЦИИ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ СЕТИ КОЛМОГОРОВА-АРНОЛЬДА

Проблема своевременного и точного обнаружения пожароопасных ситуаций является критически важной для обеспечения безопасности людей и сохранения имущества. Традиционные методы мониторинга, основанные на простых пороговых значениях для датчиков дыма и температуры, часто недостаточно эффективны, так как могут приводить к ложным срабатываниям или пропуску реальных пожароопасных ситуаций. Современные методы, использующие нейронные сети, позволяют значительно повысить точность классификации нештатной ситуации за счет анализа комплексных паттернов в данных с датчиков, представляющих из себя сложные нелинейные функции с динамически изменяющимися параметрами. Разработка таких моделей требует внимания к сбору, разметке и обработке данных, к выбору архитектуры нейронной сети для конкретной задачи, потому как качественная разметка данных и выбор желаемой архитектуры нейронной сети, напрямую влияет на выделение искомым паттернов, а также нахождение скрытых паттернов, которые невозможно или затруднительно определить традиционными методами. В статье исследуется алгоритм классификации пожароопасных ситуаций, основанный на сети Колмогорова-Арнольда (KAN). Данный алгоритм применяется для обработки данных с комплекса взаимосвязанных пожарных датчиков и предназначен для обнаружения и классификации различных типов пожароопасных ситуаций. Ключевым элементом разработки является использование сети Колмогорова-Арнольда, которая благодаря своей архитектуре способна моделировать сложные функциональные зависимости между входными данными. В качестве входных данных используются показания с комплекса взаимосвязанных пожарных датчиков, таких как датчики температуры, дыма. Для повышения точности классификации проводится разметка данных с использованием экспертных знаний. Для реализации алгоритма использовался язык программирования Python, совместно с библиотеками Pytorch, ruKan, scikit-learn. В статье приводятся результаты тестирования модели на реальных данных и обсуждаются возможные направления для дальнейшего улучшения алгоритма. В ходе экспериментов было показано, что предложенная модель демонстрирует высокую точность классификации пожароопасных ситуаций, которая не уступает традиционным методам классификации данных.

Пожарный датчик; Python; нейронные сети; классификация; моделирование; разметка данных; сеть Колмогорова-Арнольда; KAN; парсинг.

S. Singh, A.V. Pribylskiy

ALGORITHM FOR CLASSIFICATION OF FIRE HAZARDOUS SITUATIONS BASED ON KOLMOGOROV-ARNOLD NETWORK

The problem of timely and accurate detection of fire hazardous situations is critical to ensure the safety of people and property. Traditional monitoring methods based on simple threshold values for smoke and temperature sensors are often insufficiently effective, as they can lead to false alarms or miss real fire hazardous situations. Modern methods using neural networks can significantly improve the accuracy of classifying an emergency situation by analyzing complex patterns in sensor data, which are complex non-linear functions with dynamically changing parameters. The development of such models requires attention to the collection, labeling and processing of data, to the choice of neural network architecture for a specific task, because high-quality data labeling and the choice of the desired neural network architecture directly affect the selection of the desired patterns, as well as the detection of hidden patterns that are impossible or difficult to determine by traditional methods. The article examines an algorithm for classify-

ing fire hazardous situations based on the Kolmogorov-Arnold network (KAN). This algorithm is used to process data from a complex of interconnected fire sensors and is designed to detect and classify various types of fire hazardous situations. The key element of the development is the use of the Kolmogorov-Arnold network, which, due to its architecture, is capable of modeling complex functional dependencies between input data. Readings from a complex of interconnected fire sensors, such as temperature and smoke sensors, are used as input data. To improve the accuracy of classification, data is labeled using expert knowledge. The Python programming language was used to implement the algorithm, together with the Pytorch, pykan, and scikit-learn libraries. The article presents the results of testing the model on real data and discusses possible directions for further improvement of the algorithm. During the experiments, it was shown that the proposed model demonstrates high accuracy in classifying fire hazardous situations, which is not inferior to traditional methods of data classification.

Fire sensor; Python; neural network; classification; modeling; data markup; Kolmogorov-Arnold Network; parsing.

Введение. Обеспечение своевременного и точного обнаружения пожароопасных ситуаций является важной задачей, обеспечивающей защиту жизни людей и сохранения имущества. В последние годы все больше внимания уделяется современным методам, использующим нейронные сети, которые способны значительно повысить точность классификации путем анализа сложных паттернов в данных с датчиков. Эти паттерны представляют собой нелинейные функции с динамически изменяющимися параметрами, которые трудно обнаружить с помощью традиционных методов.

Важным аспектом разработки и применения моделей классификации является процесс сбора, разметки и обработки данных, а также выбор оптимальной архитектуры нейронной сети для конкретной задачи. Качественная разметка данных и правильный выбор архитектуры сети играют важную роль в выявлении искомым паттернов и обнаружении скрытых закономерностей, которые не могут быть выявлены традиционными методами.

В работе рассматривается модель сети Колмогорова-Арнольда (KAN) [1, 2] для классификации пожароопасных ситуаций, данные для обучения которой получены с комплекса взаимосвязанных датчиков. Сеть Колмогорова-Арнольда благодаря своей уникальной, инновационной архитектуре способна моделировать сложные функциональные зависимости между параметрами объекта классификации, тем самым не только повышая точность обнаружения пожаров, но и предоставляя понятную и интерпретируемую модель классификации.

Цель исследования заключается в оценке пригодности сети Колмогорова-Арнольда (KAN) для задачи классификации пожароопасных ситуаций на основе полученных и заданных параметров точности.

Описание объекта исследования. Кратко описания пожарного датчика. Объектом исследования являются показания 36000 датчиков сверххранного обнаружения пожара (комплекс взаимосвязанных пожарных датчиков) [3–5], полученные в процессе их эксплуатации, а также информация об отказах с 2018- по 2023 гг., методы и средства их обработки, методы классификация [6] на основе KAN модели, RNN модели, модели Random forest, модели Optimization tree..

Конструктивно датчик состоит из 6 датчиков температуры средней инерционности, 1 датчика температуры большой инерционности, 1 быстродействующая температурного датчика, 3 датчика инфракрасного спектра обнаружения дыма и 3 датчиков ультрафиолетового канала, всего получается 8 информационных каналов по показанием температура и 6 каналов по показаниям дыма. Наличие температурных датчиков разной инерционности, позволяет подробно отслеживать динамику изменения температуры, даже при её кратковременных изменениях. Датчики обнаружения дыма расположены таким образом и в таком количестве для обнаружения дыма в угле 360 вокруг себя, что значительно увеличивает скорость обнаружения дыма, для сравнения классические датчики обладают чувствительность от 30 до 90 градусов [7–11], что значительно увеличивает время их срабатывания при возникновению пожароопасной ситуации по каналу задымленности.

Архитектура KAN модели. Архитектура KAN модели классификации пожароопасных ситуаций приведена на рис. 1 [1, 2].

Исходя из математической модели, приведенной в статье [5], а также выбранных входных и выходных параметров [6], архитектура KAN включает 5 входов, 11 выходов, а также выбранное в ходе экспериментов количество внутренних узлов равное 11. Количество входов соответствует количеству параметров комплекса пожарных датчиков используемых для анализа текущего временного отсчета для дальнейшей классификации. Количество выходов, соответствует количеству выделенных классов пожароопасных ситуаций, подробная расшифровка каждого класса представлена в работе [6].

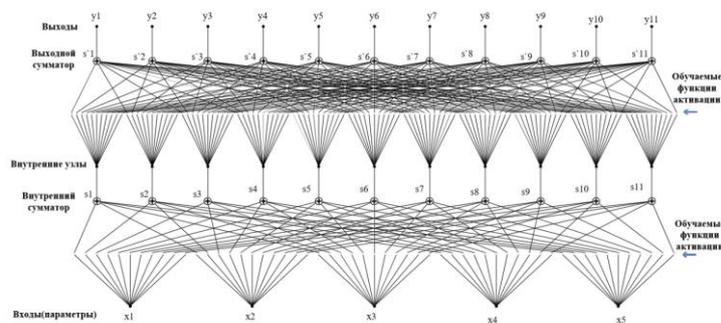


Рис. 1. Архитектура KAN модели классификации пожароопасных ситуаций

На рис. 1 x_1-x_5 – входные параметры сети, s_1-s_{11} – внутренние сумматоры, $s'_1-s'_{11}$ – выходные сумматоры, y_1-y_{11} – выходы

В отличие от классической основы MLP [12–15] архитектура KAN не имеет обучаемых весов на ребрах сети, вместо них KAN использует обучаемые функции активации, такой подход связан с используемой математикой, включая теорему аппроксимации Колмогорова-Арнольда, что позволяет также лучше интерпретировать получаемые результаты обучения. Количество обучаемых функций активации для каждого входного узла соответствует количеству выходов сети. Внутренний сумматор, суммирует все выходы с обучаемых функций активаций передавая их во внутренние узлы сети. После чего внутренние узлы снова разделяет узел на 11 обучаемых функций активации суммирует их, в результате чего получаются выходы y_1-y_{11} . Значения каждого выхода будет характеризовать принадлежность текущей комбинации входов к каждому из выделенных классов (выходов y_1-y_{11}), в данном случае, чем больше значение выхода, тем более высокая вероятность принадлежности к данному классу пожароопасной ситуации.

Алгоритм парсинга данных. Парсинг данных является одним из важнейших этапов обработки данных для дальнейшего использования с целью решения определенной задачи, например классификации нештатных ситуаций [16, 17]. Стоит отметить, что в зависимости от формата и структуры получаемых данных из базы данных мест установки пожарных датчиков, должны использоваться разные этапы парсинга, потому как конечная цель парсинга получения данных в едином формате для используемой модели нейронной сети. В случае с пожарным датчиком данных в зависимости от места установки могут быть переданы в формате матриц $m \times n$, представленных на рис. 2 и 3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
1	time	name	optic_1	optic_2	tpt	tcpu	smokelevel	zasvetka	flags	factions	f_talrm	f_tfire	f_dtalrm	f_dtfire	f_disp_alarm	f_disp_fier	f_alarm	f_fire
2	14.01.2024 0:00	1181-4	53118	49902	22.27	25	1	157	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	14.01.2024 0:00	1181-4	53118	49902	22.27	25	1	157	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	14.01.2024 0:00	1181-4	53118	49900	22.28	25	4	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	14.01.2024 0:00	1181-4	53118	49900	22.28	25	4	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	14.01.2024 0:00	1181-4	53115	49898	22.27	25	13	157	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	14.01.2024 0:00	1181-4	53115	49898	22.27	25	13	157	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	14.01.2024 0:00	1181-4	53116	49900	22.27	25	5	157	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	14.01.2024 0:00	1181-4	53116	49900	22.27	25	5	157	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	14.01.2024 0:00	1181-4	53119	49903	22.27	25	18	156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	14.01.2024 0:00	1181-4	53119	49903	22.27	25	18	156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	14.01.2024 0:00	1181-4	53121	49901	22.27	25	8	155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	14.01.2024 0:00	1181-4	53121	49901	22.27	25	8	155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	14.01.2024 0:00	1181-4	53120	49902	22.27	25	2	156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	14.01.2024 0:00	1181-4	53120	49902	22.27	25	2	156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	14.01.2024 0:00	1181-4	53121	49903	22.28	25	2	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	14.01.2024 0:00	1181-4	53121	49903	22.28	25	2	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 2. Первый паттерн данных из базы данных

Из рис. 2 и 3 видно, что данные из разных источников имеют разное количество столбцов – различных признаков, включающих информативные и неинформативные для задачи классификации. С этой целью разработан алгоритм парсинга данных из базы данных с возможностью переключения его в автоматический и ручной режим.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Дата_и_время	V1_PСН Темп1	V1_PСН Темп2	V1_PСН Красн1	V1_PСН Красн2	V1_PСН Красн3	V1_PСН Синий1	V1_PСН Синий2	V1_PСН Синий3
2	11.11.2022 0:00	26,75	24,75	60119	60117	60120	60123	60121	60118
3	11.11.2022 0:00	26,75	24,75	60119	60117	60120	60123	60121	60118
4	11.11.2022 0:00	26,75	24,75	60119	60117	60120	60123	60121	60118
5	11.11.2022 0:00	26,76	24,77	60123	60120	60117	60118	60123	60122
6	11.11.2022 0:00	26,76	24,77	60123	60120	60117	60118	60123	60122
7	11.11.2022 0:00	26,76	24,77	60123	60120	60117	60118	60123	60122
8	11.11.2022 0:00	26,78	24,77	60119	60123	60120	60118	60123	60122
9	11.11.2022 0:00	26,78	24,77	60119	60123	60120	60118	60123	60122
10	11.11.2022 0:00	26,78	24,77	60119	60123	60120	60118	60123	60122

Рис. 3. Второй паттерн данных из базы данных

Алгоритм парсинга данных представлен на рис. 4.

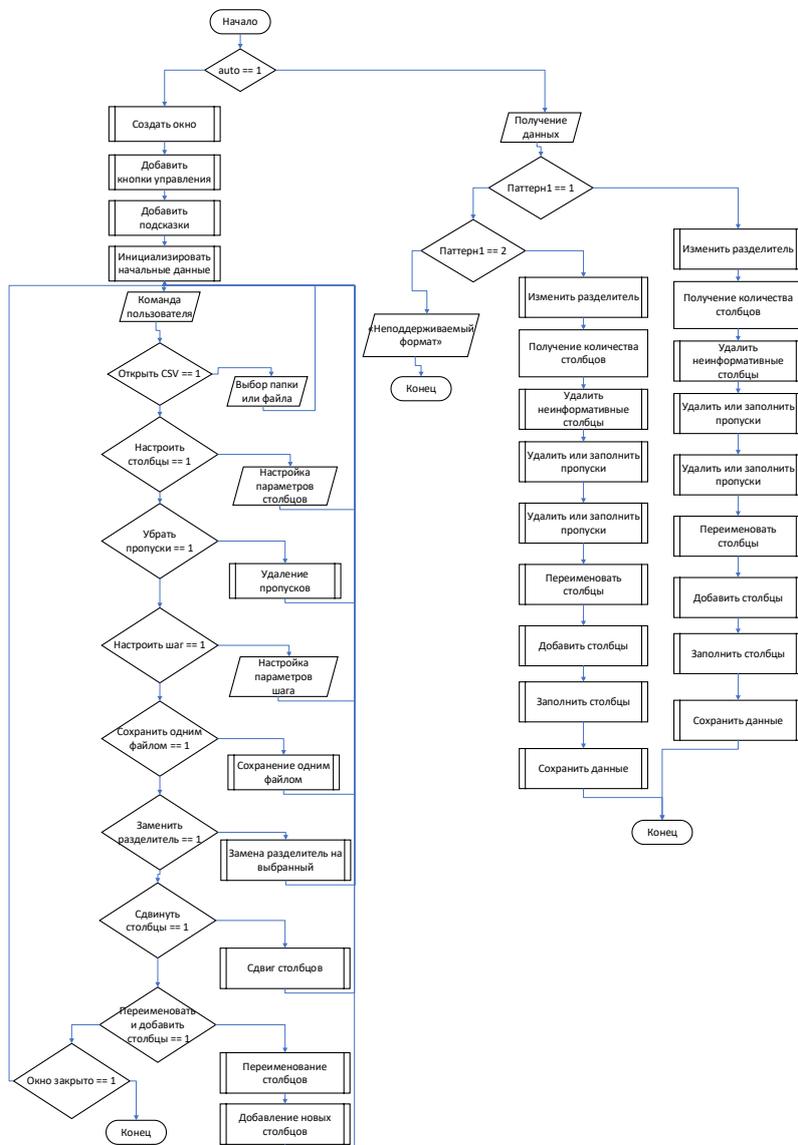


Рис. 4. Блок-схема алгоритма парсинга данных

Из рис. 4 условно можно выделить два ветвления $auto == 1$ и $auto != 1$, $auto$ является флагом включения автоматического режима в случае, если равен 1, и ручного режима в случае, если $auto$ не равен 0. Разберем каждый из режимов подробнее.

Ручной режим необходим для подготовки обучающих данных, в связи наличия более гибкого и контролируемого вручную функционала изменения получаемых данных. Автоматическим режимом используется для работы обученной классифицирующей модели, а именно выполняет парсинг данных, получаемых в реальном времени.

Получаемые данные из базы данных условно можно разделить на два общих паттерна по максимальному количеству столбцов данных, а также типу и содержанию данных. Примеры паттернов представлены на рис. 2, 3. Алгоритм сравнивает полученные из БД данные с каждым паттерном, в случае соответствия одному из паттернов выполняет предписанные предписания, если полученные данные не соответствуют ни одному из паттернов, выводится соответствующая ошибка, сохраняется файл вызвавшие ошибку для его дальнейшего анализа и при необходимости добавления нового паттерна.

Данные для обучения модели. Обучающая выборка данных, содержит разделение данных по 5 параметрам: температура вне датчика, температура внутри датчика и три параметра задмыленности, за основу взяты реальные данные обнаруженных аномалий в метрополитенах на местах установки комплекса взаимосвязанных пожарных датчиков. В выборку вошло 126 дней с размеченными маркерами обнаруженных аномалий, разделенных на 13 классов. Более подробно процесс разбиения на классы рассмотрен в статье [6]. Всего в выборку вошло 1 333 000 временных отрезков.

Тестовая выборка устроена по аналогичному обучающей выборке принципу, её размер составляет 60 дней, в выборку вошло 632 022 отрезка.

Обработка и подготовка данных. Нормализация данных с пожарных датчиков является обязательным шагом [18], данные могут принимать широкий диапазон значений, что затрудняет их интерпретацию с помощью нейронных сетей [19]. В работе исследовались следующие методы нормализации данных: Min-Max scaling с диапазоном изменений значений, учитывающих минимальное и максимальное возможное значение, принимаемое каждым параметром, Min-Max scaling, Z-score и Robust scaling [20–22].

Рассмотрим Min-Max scaling с диапазоном изменений значений подробнее. Ключевым его отличием от стандартного Min-Max заключается в том, что минимальное и максимальное значение выбирается не исходя из минимального и максимального значения в данных, а исходя из реального изменения параметра.

Формула нормализованного значения признака x_n Min-Max scaling с диапазоном изменений значений:

$$x_n = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} * (new_{max} - new_{min}) + new_{min}, \quad (1)$$

где x – исходное значение признака.

x_{min} – минимальное значение признака в исходных данных.

x_{max} – максимальное значение признака в исходных данных.

new_{max} – нижняя граница нового диапазона (в данном случае 0).

new_{min} – верхняя граница нового диапазона (в данном случае 1).

Например, диапазон температуры изменяется от -50 до 200 градусов. Подставив в формулу 1, получим:

$$x_n = \frac{x - (-50)}{200 - (-50)} * (1 - 0) + 0 = \frac{x + 50}{250} = x * \frac{1}{250} + 0.2 == \frac{23.49}{250} + 0.2 = 0.29. \quad (2)$$

Формула расчета x_{zn} нормализованного значения с помощью Z-score:

$$x_{zn} = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (3)$$

где μ – среднее значение признака; σ – стандартное отклонение признака.

Например, для температуры снаружи датчика с используемой выборкой данных, значения очередного нормализованного значения x_{zn1} :

$$x_{zn1} = \frac{23.49-30.37}{7.15} = -0.96, \quad (4)$$

Формула расчета $x_{nrobust}$ нормализованного значения с помощью Robust scaling:

$$x_{nrobust} = \frac{x - \text{median}(x)}{IQR(x)}, \quad (5)$$

где $\text{median}(x)$ – медиана признака; $IQR(x)$ – межквартильный размах признака (разница между 75-м и 25-м процентилями)

Например, для температуры снаружи датчика с используемой выборкой данных, значения очередного нормализованного значения $x_{nrobust1}$:

$$x_{nrobust1} = \frac{23.49-30.37}{10.18} = -0.69. \quad (6)$$

Следует отметить, что диапазон изменения показаний датчика температуры изменятся с -50 до 200 градусов.

Входе экспериментов, включающих моделирования KAN [23–25] алгоритма классификации с применением нормализации и без неё, сделан вывод, что KAN модель имеет низкую точность при работе с ненормализованными данными [26–32].

Тестирование обученной нейронной сети. Точности алгоритма оценивается по трем параметрам: общая точность системы, точность обнаружения аномалий, ошибка обнаружения. Дополнительно ошибки обнаружения подразделяются на необнаруженные аномалии и ложные аномалии, формулы расчета точности рассмотрены в статье [6].

Требования к параметрам точности алгоритма классификации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Желаемые параметры точности

Accuracy, %	Precision, %	Detection Error, %	ignored, %	fake, %
Не менее 88	Не менее 85	Не более 15	нет	нет

Таблица 2

Изменения параметров точности классификаторов на обучающей выборке

Модель	Метод нормализации	Accuracy, %	Precision, %	Detection Error, %	ignored, %	fake, %
KAN	Min-Max scale	98.57	93.13	6.87	72.61	27.39
KAN	Z-score	95.33	82.22	17.78	55.43	44.57
KAN	Robust scaling	97.30	86.93	13.07	94.96	5.04
Random Forest	Min-Max scale	99.96	91.44	8.56	88.24	11.76
Random Forest	Z-score	99.96	90.84	9.16	88.46	11.54
Random Forest	Robust scaling	99.96	91.34	8.66	88.72	11.28
RNN	Min-Max scale	99.00	91	9.00	71.65	28.35
RNN	Z-score	98.56	89.55	10.45	70.22	29.78
RNN	Robust scaling	98.31	90.22	9.78	73.87	26.13

Таблица 3

Изменения параметров точности классификаторов на тестовой выборке

Модель	Метод нормализации	Accuracy, %	Precision, %	Detection Error, %	ignored, %	fake, %
KAN	Min-Max scale	89.88	87.23	12.77	72.44	27.56
KAN	Z-score	85.33	84.22	15.78	82.34	17.66
KAN	Robust scaling	85.58	84.39	15.61	74.78	15.22
Random Forest	Min-Max scale	98.49	97.33	2.67	83.02	16.98
Random Forest	Z-score	97.12	94.51	5.49	82.69	17.31
Random Forest	Robust scaling	98.25	95.54	4.46	80.77	19.23
RNN	Min-Max scale	98.65	97.36	2.64	63.45	36.55
RNN	Z-score	96.55	92.55	7.45	61.25	38.75
RNN	Robust scaling	95.55	93.67	6.33	55.57	44.43

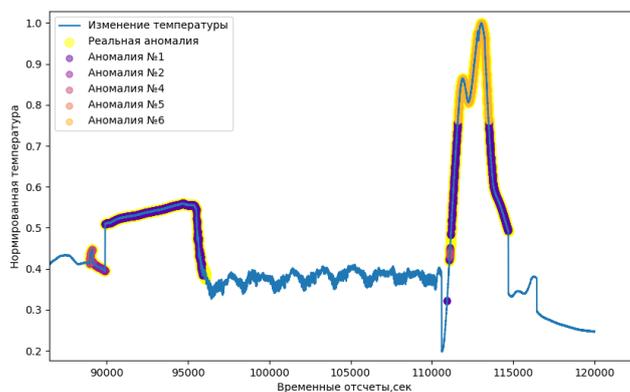


Рис. 5. График классификации данных на выделенном участке с помощью KAN классификатора с Min-Max нормализации

Обсуждение. Анализируя полученные параметры точности после моделирования алгоритма с требованиями, поставленными в таблице 1, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм классификации соответствует поставленным требованиям: accuracy (общая точность) не менее 88%, precision (точность обнаружения) не менее 85%, detection error (ошибка обнаружения) не более 15% при методе нормализации Min-Max scale. В ходе работы с обучающей выборкой получены следующие показатели точности: общая точность 98.57%, точность обнаружения 93.13%, ошибка обнаружения 6.87%, что не ниже поставленных требований. Классификация данных тестовой выборки показала: общая точность 89.88%, точность обнаружения 87.23, ошибка обнаружения 12.77%, что также не ниже поставленных требований. Исходя из полученных результатов предложенный алгоритм классификации на основе KAN, можно использовать для классификации данных получаемых из комплекса взаимосвязанных датчиков.

Заключение. Алгоритм классификации пожароопасной ситуаций с помощью KAN сетей является новым решением, обладающим исходя из полученных значений точности хорошими перспективами использования. Применение этой модели может не только повысить точность и эффективность принятия решения в задаче классификации, но откроет возможность к проведению более глубокого анализа пожароопасных ситуаций, на основе получаемого символического представления модели классификации

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. KAN documentation. – URL: <https://kindxiaoming.github.io/pykan/> (дата обращения: 03.08.2024).
2. *Ziming Liu, Yixuan Wang*. KAN: Kolmogorov-Arnold Networks, 30 Apr 2024. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19756>.
3. *Саутин И.Г.* Противопожарная защита: технологии и решения // Транспорт, Противопожарная защита. Пожарная автоматика. Средства спасения. – 2018.
4. *Саутин И.Г.* Особое мнение. Можно ли доверить свою жизнь дымовому пожарному извещателю? // Алгоритм безопасности. – 2019. – № 6.
5. *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.
6. *Сингх С., Прибыльский А.В.* Алгоритм классификации пожароопасных ситуаций на основе нейросетевых технологий // Известие ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 138-147.
7. NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code. – 2019.
8. UL 268: Standard for Smoke Detectors for Fire Protective Signaling Systems. – 2019.
9. ISO 7240-14: Fire detection and alarm systems – Part 14: Requirements and test methods for smoke detectors. – 2018.
10. BS 5839-1:2017: Fire alarm systems for commercial and industrial premises. Code of practice for design, installation, commissioning and maintenance.
11. ГОСТ Р 53325-2009: Системы пожарной сигнализации. Общие технические требования.
12. *Полехин П.В. [и др.]*. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: Сб. статей / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. – М.: ВНИИПО, 2021. – 112 с.
13. *Solovyeva E.* Types of recurrent neural networks for non-linear dynamic system modelling // Proceedings of 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM2017). St. Petersburg: Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI». Russia, St. Petersburg, May 24–26, 2017. – P. 1-4.
14. *Wang Z., Yan W., Oates T.* Time series classification from scratch with deep neural networks: A strong baseline // In: 2017 International Joint Conference on Neural Networks. – IJCNN, IEEE, 2017. – P. 1578-1585.
15. *Fedorov A., Bytcinskaya T., Lukyanchenko A., Hung T.D.* Trends in the development of automatic fire detectors // Technol. Technosphere Saf. – 2009. – 23. – P. 111-114. – Available online: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-razvitiya-avtomaticheskikh-pozharnyh-izveschateley-1> (accessed on 20 December 2023).
16. *Han J., Kamber M., & Pei J.* Data Normalization for Big Data Analytics // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2017. – 29 (10). – P. 2435-2448. – DOI: 10.1109/TKDE.2017.2734444.
17. *Rao S.S., Iyengar S.S., & Venayagamoorthy G.K.* Big Data Normalization: A Survey // IEEE Transactions on Big Data. – 2018. – 4 (2). – P. 149-163. – DOI: 10.1109/TBDDATA.2018.2823718.
18. *Singh A.K., Singh S.K., & Singh R.K.* Data Parsing and Normalization for Social Media Analytics // Journal of Intelligent Information Systems. – 2020. – 56 (2). – P. 257-273. – DOI: 10.1007/s10844-019-00563-4.
19. *Liu J., Zhang Y., & Li X.* Machine Learning for Data Normalization in Big Data Analytics // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2019. – 30 (1). – P. 201-214. – DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2873818.
20. *Kate R.J.* Using dynamic time warping distances as features for improved timeseries classification // Data Min. Knowl. Discov. – 2016. – 30 (2). – P. 283-312.
21. *Abandah G., Abdel-Karim A.* Accurate and fast recurrent neural network solution for the automatic diacritization of Arabic text // Jordan. J. Comp. Inform. Technol. – 2020. – 6 (2). – P. 103-121.
22. *Géron A.* Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. O'Reilly Media. – 2019.
23. Pykan documentation and apps. – URL: <https://github.com/KindXiaoming/pykan> (дата обращения: 03.08.2024).
24. Scikit-learn for supervised learning documentation. – URL: https://scikit-learn.org/stable/supervised_learning.html (дата обращения: 03.08.2024).
25. MathWorks. «MATLAB & Simulink Help Center» MathWorks, 2023. – <https://www.mathworks.com/help/index.html> (accessed 20 December 2023).
26. *Bozorgasl Z., & Chen H.* Wav-KAN: Wavelet kolmogorov-arnold networks // arXiv preprint arXiv:2405.12832. – June 2024. – Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2405.12832>.
27. *Federico Girosi, Tomaso Poggio.* Representation Properties of Networks: Kolmogorov's Theorem Is Irrelevant // Neural Comput. – 1989. – 1 (4). – P. 465-469. – DOI: <https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.465>.

28. Galitsky B.A. Kolmogorov-Arnold Network for Word-Level Explainable Meaning Representation // Preprints. – 2024. – Retrieved from <https://www.preprints.org/manuscript/202405.1981>.
29. Hao H., Zhang X., Li B., & Zhou A. A First Look at Kolmogorov-Arnold Networks in Surrogate-assisted Evolutionary Algorithms // arXiv preprint arXiv:2405.16494. – 2024. – Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2405.16494>.
30. Vaca-Rubio C.J., Blanco L., & Pereira R. Kolmogorov-Arnold Networks (KANs) for Time Series Analysis // arXiv preprint arXiv:2405.08790. – 2024. – Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2405.08790>.
31. Galitsky B.A. Kolmogorov-Arnold Network for Word-Level Explainable Meaning Representation // Preprints. – 2024. – Retrieved from <https://www.preprints.org/manuscript/202405.1981>.
32. Genet R., & Inzirillo H. TKAN: Temporal Kolmogorov-Arnold Networks // arXiv preprint arXiv:2405.07344. – 2024. – Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2405.07344>.

REFERENCES

1. KAN documentation. Available at: <https://kindxiaoming.github.io/pykan/> (accessed: 03 August 2024).
2. Ziming Liu, Yixuan Wang. KAN: Kolmogorov-Arnold Networks, 30 Apr 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19756>.
3. 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.
4. Sautin I.G. Osoboe mnenie. Mozhno 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.
5. 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.
6. 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], *Izvestie YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3, pp. 138-147.
7. NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code, 2019.
8. UL 268: Standard for Smoke Detectors for Fire Protective Signaling Systems, 2019.
9. ISO 7240-14: Fire detection and alarm systems – Part 14: Requirements and test methods for smoke detectors, 2018.
10. BS 5839-1:2017: Fire alarm systems for commercial and industrial premises. Code of practice for design, installation, commissioning and maintenance.
11. GOST R 53325-2009: Sistemy pozharnoy signalizatsii. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [GOST R 53325-2009: Fire alarm systems. General technical requirements].
12. Polekhin P.V. [i dr.]. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2020 godu: Sb. statey [Fires and fire safety in 2020: Collection of articles], under the general ed. of D.M. Gordienko. Moscow: VNIPO, 2021, 112 p.
13. Solovyeva E. Types of recurrent neural networks for non-linear dynamic system modeling, *Proceedings of 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM2017)*. St. Petersburg: Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI». Russia, St. Petersburg, May 24–26, 2017, pp. 1-4.
14. Wang Z., Yan W., Oates T. Time series classification from scratch with deep neural networks: A strong baseline, *In: 2017 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN, IEEE, 2017*, pp. 1578-1585.
15. Fedorov A., Bytchinskaya T., Lukyanchenko A., Hung T.D. Trends in the development of automatic fire detectors, *Technol. Technosphere Saf.*, 2009, 23, pp. 111-114. Available online: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-razvitiya-avtomaticheskikh-pozharnyh-izveshchateley-1> (accessed on 20 December 2023).
16. Han J., Kamber M., & Pei J. Data Normalization for Big Data Analytics, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2017, 29 (10), pp. 2435-2448. DOI: 10.1109/TKDE.2017.2734444.
17. Rao S.S., Iyengar S.S., & Venayagamoorthy G.K. Big Data Normalization: A Survey, *IEEE Transactions on Big Data*, 2018, 4 (2), pp. 149-163. DOI: 10.1109/TBDATA.2018.2823718.
18. Singh A.K., Singh S.K., & Singh R.K. Data Parsing and Normalization for Social Media Analytics, *Journal of Intelligent Information Systems*, 2020, 56 (2), pp. 257-273. DOI: 10.1007/s10844-019-00563-4.
19. Liu J., Zhang Y., & Li X. Machine Learning for Data Normalization in Big Data Analytics, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2019, 30 (1), pp. 201-214. DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2873818.
20. Kate R.J. Using dynamic time warping distances as features for improved timeseries classification, *Data Min. Knowl. Discov*, 2016, 30 (2), pp. 283-312.

21. *Abandah G., Abdel-Karim A.* Accurate and fast recurrent neural network solution for the automatic diacritization of Arabic text, *Jordan. J. Comp. Inform. Technol.*, 2020, 6 (2), pp. 103-121.
22. *Géron A.* Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. O'Reilly Media, 2019.
23. Pykan documentation and apps. Available at: <https://github.com/KindXiaoming/pykan> (accessed 03 August 2024).
24. Scikit-learn for supervised learning documentation. Available at: https://scikit-learn.org/stable/supervised_learning.html (03 August 2024).
25. MathWorks. «MATLAB & Simulink Help Center» MathWorks, 2023. Available at: <https://www.mathworks.com/help/index.html> (accessed 20 December 2023).
26. *Bozorgasl Z., & Chen H.* Wav-KAN: Wavelet kolmogorov-arnold networks, *arXiv preprint arXiv:2405.12832*, June 2024. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2405.12832>.
27. *Federico Giosi, Tomaso Poggio.* Representation Properties of Networks: Kolmogorov's Theorem Is Irrelevant, *Neural Comput.*, 1989, 1 (4), pp. 465-469. DOI: <https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.465>.
28. *Galitsky B.A.* Kolmogorov-Arnold Network for Word-Level Explainable Meaning Representation, *Preprints*, 2024. Retrieved from <https://www.preprints.org/manuscript/202405.1981>.
29. *Hao H., Zhang X., Li B., & Zhou A.* A First Look at Kolmogorov-Arnold Networks in Surrogate-assisted Evolutionary Algorithms, *arXiv preprint arXiv:2405.16494*, 2024. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2405.16494>.
30. *Vaca-Rubio C.J., Blanco L., & Pereira R.* Kolmogorov-Arnold Networks (KANs) for Time Series Analysis, *arXiv preprint arXiv:2405.08790*, 2024. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2405.08790>.
31. *Galitsky B.A.* Kolmogorov-Arnold Network for Word-Level Explainable Meaning Representation, *Preprints*, 2024. Retrieved from <https://www.preprints.org/manuscript/202405.1981>.
32. *Genet R., & Inzirillo H.* TKAN: Temporal Kolmogorov-Arnold Networks, *arXiv preprint arXiv:2405.07344*, 2024. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2405.07344>.

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

Прибыльский Алексей Васильевич – e-mail: apribylsky@sfedu.ru; тел.: +79885619718; 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.

Pribylskiy Alexey Vasilievich – e-mail: apribylsky@sfedu.ru; phone: +79885619718; the Department of Automatic Control Systems; cand. of eng. sc.; assistant professor.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-15-29

В.В. Курейчик, Ю.В. Балясова, В.В. Бова

ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТРЕХМЕРНОЙ УПАКОВКИ ПРИ МОРСКИХ ГРУЗОПЕРЕВОЗКАХ

Описана проблема трёхмерной упаковки товаров в различные типы контейнеров при осуществлении морских грузоперевозок. Морские грузоперевозки играют значительную роль в международной торговле, реализуются в специфических и нестандартных условиях, характеризуются усиленной влажностью, контактом с морской солью, вибрацией, интерференцией температур и осуществляются посредством судов контейнеровозов, транспортирующих различные категории товаров в контейнерах, подбираемых с учётом специфики перевозимого груза, что обеспечивает надёжность и безопасность. Особую важность приобретает присутствие защиты товара от многообразных негативных и техногенных факторов окружающей среды, что подтверждает немаловажность правильно разработанной морской упаковки груза, обеспечивающей сохранение товара, оборудования, сырья, либо материалов на всём времени транспортировки по морю, а также надёжного крепления на палубе, либо

внутри грузовых отсеков, исключая возможности повреждений груза, посредством воздействия вибрационных и статических нагрузок. В статье описана задача трёхмерной упаковки в контейнеры при морских грузоперевозках. Рассмотрены критерии и ограничения, построена модифицированная комбинированная многокритериальная целевая функция. Ее значение должно стремиться к 1, что соответствует 100% заполнению пустот. Также, в работе проведён краткий обзор и анализ методов и алгоритмов поиска решения задачи трёхмерной упаковки, выявлены их особенности, достоинства и недостатки. С учётом проведённого анализа отмечено, что метаэвристические методы и алгоритмы поиска эффективны для решения NP-сложной задачи трёхмерной упаковки так, как позволяют получать наборы квазиоптимальных решений за полиномиальное время.

Морские грузоперевозки; логистика; задача трёхмерной упаковки; метаэвристические методы и алгоритмы.

V.V. Kureichik, Y.V. Balyasova, V.V. Bova

OVERVIEW AND ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL PACKAGING FOR MARINE CARGO TRANSPORTATION

This article describes the problem of three-dimensional packaging of goods in various types of containers during maritime cargo transportation. Maritime cargo transportation plays a significant role in international trade, is carried out in specific and non-standard conditions, is characterized by increased humidity, contact with sea salt, vibration, temperature interference and is carried out by container ships transporting various categories of goods in containers selected taking into account the specifics of the cargo being transported, which ensures reliability and safety. Of particular importance is the presence of protection of goods from a variety of negative and man-made environmental factors, which confirms the importance of properly designed marine cargo packaging, ensuring the preservation of goods, equipment, raw materials, or materials throughout the entire time of transportation by sea, as well as reliable fastening on deck or inside cargo compartments, excluding the possibility of damage to cargo, through exposure vibration and static loads. The article describes the task of three-dimensional packaging in containers for marine cargo transportation. Criteria and constraints are considered, and a modified combined multi-criteria objective function is constructed. Its value should tend to 1, which corresponds to 100% filling of voids. Also, the paper provides a brief overview and analysis of methods and algorithms for finding solutions to the problem of three-dimensional packaging, their features, advantages and disadvantages are revealed. Taking into account the analysis, it is noted that metaheuristic methods and search algorithms are effective for solving the NP-complex problem of three-dimensional packaging, as they allow obtaining sets of quasi-optimal solutions in polynomial time.

Marine cargo transportation; logistics; the problem of three-dimensional packaging; modified (metaheuristic); accurate and heuristic methods and algorithms.

Проблемы морских грузоперевозок. Морской транспорт – один из наиболее востребованных вариантов транспортирования многообразных товаров, сталкивающийся в процессе выполнения с множеством проблем: перегруженностью портовых терминалов; порчей, либо утратой груза; длительным оформлением документов; сложностью планирования логистики; курсовой разницы и так далее. Данный вид грузоперевозок выполняется в достаточно специфических условиях посредством использования морских контейнеров, классификация которых показана на рис. 1 [1].

За счёт введения морских контейнеров в XX веке, сфера морских грузоперевозок вышла на новый уровень. Морской контейнер – многооборотная металлическая тара из кортенювской стали, отвечает стандартам ISO и ГОСТ [2, 3], устойчива к механическим воздействиям, пригодна к эксплуатации в любых погодных условиях, используется для грузоперевозок различных категорий товаров по всему миру, срок службы составляет 15-20 лет. Морские контейнеры возможно перегружать с кораблей на поезда, грузовики в комбинации с авиасообщением, обеспечивая интермодальность.

Характеристики контейнеров

	Длина внутри 5,895 м	Ширина двери 2,340 м	Высота двери 2,292 м	Вместимость 33 м ³	Вес конструкции 2 230 кг	Максимальный груз 28 230 кг
	Длина внутри 12,029 м	Ширина двери 2,340 м	Высота двери 2,292 м	Вместимость 67 м ³	Вес конструкции 3 780 кг	Максимальный груз 26 700 кг
	Длина внутри 12,024 м	Ширина двери 2,340 м	Высота двери 2,597 м	Вместимость 76 м ³	Вес конструкции 4 020 кг	Максимальный груз 26 460 кг
	Длина внутри 5,888 м	Ширина двери 2,286 м	Высота двери 2,184 м	Вместимость 32 м ³	Вес конструкции 2 250 кг	Максимальный груз 30 480 кг
	Длина внутри 12,029 м	Ширина двери 2,341 м	Высота двери 2,274 м	Вместимость 65 м ³	Вес конструкции 3 810 кг	Максимальный груз 26 670 кг
	Длина внутри 5,698 м	Ширина двери 0,000 м	Высота двери 0,000 м	Вместимость 0 м ³	Вес конструкции 2 500 кг	Максимальный груз 21 500 кг
	Длина внутри 11,832 м	Ширина двери 0,000 м	Высота двери 0,000 м			
	Длина внутри 12,020 м	Ширина двери 2,390 м	Высота двери 2,260 м	Вместимость 70,1 м ³	Вес конструкции 4 200 кг	Максимальный груз 27 000 кг
	Длина внутри 13,540 м	Ширина двери 2,400 м	Высота двери 2,580 м	Вместимость 88,1 м ³	Вес конструкции 4 800 кг	Максимальный груз 25 680 кг
	Длина внутри 6,058 м	Ширина двери 0,000 м	Высота двери 0,000 м	Вместимость 0 м ³	Вес конструкции 2 520 кг	Максимальный груз 27 960 кг
	Длина внутри 12,192 м	Ширина двери 0,000 м	Высота двери 0,000 м	Вместимость 0 м ³	Вес конструкции 5 700 кг	Максимальный груз 39 300 кг
	Длина внутри 5,724 м	Ширина двери 2,286 м	Высота двери 2,067 м	Вместимость 26 м ³	Вес конструкции 2 550 кг	Максимальный груз 21 960 кг
	Длина внутри 11,840 м	Ширина двери 2,286 м	Высота двери 2,195 м	Вместимость 60 м ³	Вес конструкции 3 850 кг	Максимальный груз 26 630 кг
	Длина внутри 5,934 м	Ширина двери 2,335 м	Высота двери 2,292 м	Вместимость 32 м ³	Вес конструкции 2 450 кг	Максимальный груз 21 550 кг
	Длина внутри 6,058 м	Ширина двери 0,000 м	Высота двери 0,000 м			

Рис. 1 Морские контейнеры

Конструкция морского контейнера зависит от специфики перевозимого в нём товара. В связи с этим международной организацией по стандартизации «ISO» принят стандарт, содержащий классификацию морских контейнеров [2, 3]. Основной сегмент перевозимых контейнерами контейнеров – стандартные: 20 (TEU), 40 (TEU) и 45 фотов, со своей грузоподъёмностью и типом конструкции: универсальные (GP, DV и DC) – перевозят сухие грузы и иные товары потребления; термоконтейнеры – перевозят продукты питания, фармацевтику, электронику); Pallet Wide – доставляют паллетированные грузы; Flat Container – перевозят листовую металл или иные плоские материалы; Open Top – негабаритные грузы; Tank – перевозят жидкие или газообразные грузы (нефть, химикаты); Bulk Container – перевозят сыпучие грузы (зерно или уголь); High Cube (2,9 м), перевозит объёмные грузы. Flat Rack – перевозят автомобили и иные крупные средства; контейнеры с вентиляцией (VT и TC) – перевозят животных; рефрижераторы (RE, RT, RS) – оборудованы системой поддержки температуры для перевозки товаров; IBC, IBC, IMO – перевозят опасные грузы. Отдельные грузы перевозят в контейнерах с нестандартными размерами. Так как задача трёхмерной упаковки, является NP-сложной, то ее необходимо разделить на 4 этапа размещение груза на паллеты, упаковка палет в контейнер, а далее их размещение на палубу и в трюм корабля.

Описание и постановка задачи трёхмерной упаковки. Пусть имеется трехмерная область контейнер M : шириной W , длиной L и высотой H , а также набор блоков. Итоговый результат упаковки опишем в виде плана последовательности параллелепипедов, описывающего алгоритм пошаговой их комплекации непосредственно в сам контейнер. Приобретаемая итоговая информация: план упаковки блоков, изображённый в объёме; показатель целевой функции («ЦФ»), отражающей критерии качества оптимизации и время решения задачи.

Объект возможно описать кортежем из 4-х компонентов $\langle w_i, l_i, h_i, m_i \rangle$, а именно, параметры объекта: w_i – ширина, l_i – длина, h_i – высота и m_i – вес объекта [4]. При решении задачи расположения объектов, помеченных задаваемым типом, в пространстве опи-

сывается множеством $K = \{k_i = (\langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle, \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle) \mid i=1, 2, \dots, n\}$, в котором $\langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle, \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle$ – координаты углов объекта – наиболее близкие к началу осей координат и наиболее дальние, которые необходимо разместить в контейнер. Рассматривая данную задачу, необходимо учитывать следующие ограничения [4, 5]:

1. У каждого контейнера высота тождественна.
2. За установленные границы размещаемые объекты не должны выходить.
3. Совместный объём всех размещаемых объектов не должен быть больше объёма контейнера:

$$\sum_{i=1}^n V_i \leq W_x L_y H_z,$$

где V_i – объём объекта

4. Запрещено размещать объекты друг на друга;
5. Совместный вес всех размещаемых объектов не должен превышать установленный лимит загрузки контейнера:

$$\sum S_{об} \leq S_{лим},$$

где $S_{об}$ – вес объекта, $S_{лим}$ – наибольший вес всех объектов.

Критерий оптимизации – объём, занимаемый объектами, и тогда целевая функция описывается следующим образом:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n V_{полез}}{V_{кон}} \rightarrow 1,$$

где $V_{полез}$ – полезный объём, $V_{кон}$ – объём контейнера.

Другими словами, необходимо уменьшать пустоты в контейнере. Тогда целевая функция (ЦФ) должна стремиться к единице и заполненности области на 100 %. Предложенная ЦФ не полностью учитывает все возможные критерии задачи трёхмерной упаковки при морских грузоперевозках, поэтому авторы предлагают использовать модифицированную комбинированную многокритериальную ЦФ [5]:

$$ЦФ = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V} \times Q^1 + P^2 \times Q^2 + P^3 \times Q^3 + P^4 \times Q^4,$$

где P^2 – отношение числа упакованных объектов в контейнер к числу всех объектов, подлежащих упаковке; P^3 – число объектов одного размера, упакованных подряд так, стороны которых соприкасаются; P^4 – отношение горизонтально расположенных объектов к числу всех объектов, подлежащих упаковке; Q^2 – коэффициент важности числа упакованных объектов в контейнер; Q^3 – коэффициент важности упаковки объектов одного размера с одинаковыми сторонами друг к другу; Q^4 – коэффициент важности упаковки объектов является горизонтально ориентированным. Коэффициенты Q^1, Q^2, Q^3, Q^4 – задаются лицом, принимающим решение. P^2, P^3 и P^4 – вычисляются при расчёте ЦФ. Данную целевую функцию необходимо максимизировать: $ЦФ \rightarrow \max$.

Обзор и анализ методов и алгоритмов трёхмерной упаковки. Кратко рассмотрим некоторые существующие методы и алгоритмы решения задачи трёхмерной упаковки:

Алгоритм локального поиска с чередующимися окрестностями (VNS) – известный метод решения задач дискретной оптимизации, в частности автоматической группировки предложен Н. Младеновичем и П. Хансенем [6]. Основная идея (VNS) заключается в изменении размера окрестности в процессе поиска реализуя детерминированный, вероятностный или смешанные механизмы. Здесь для некоторого промежуточного решения назначается множество окрестностей, которые по очереди исследуются. Если найдено лучшее решение, то его заменяют на промежуточное и поиск в той же окрестности продолжается, если улучшения не происходит, то выбирается следующая окрестность для поиска. Критерием остановки служит время, число итераций или нахождение субоптимального решения. Существует много модификаций данного метода. Это VND – детерминированный локаль-

ный спуск с чередующимися окрестностями и RVNS – вероятностный локальный спуск с чередующимися окрестностями. Достоинства: простота реализации; гибкость и высокая результативность; позволяет получать наборы субоптимальных решений и избегать попаданий в локальные оптимумы. Недостатки: требует значительных вычислительных и временных затрат при решении задач большой размерности.

Алгоритм имитации отжига (SA) – создан Скоттом Киркпатриком, Д. Гелатти (George Gelatt) и М. Веччи в 1983 году [7], отнесён к метаэвристическим методам стохастической оптимизации, используется для решения широкого спектра задач оптимизации: комбинаторной, глобальной, дискретной, хранит интервальный результат решения. Алгоритм моделирует процесс отжига металла, в процессе которого металл нагревается а, затем медленно охлаждается и равномерно распределяет свою внутреннюю энергию. В данном алгоритме реализуются три важные процедуры, такие как: использование случайности, что способствует исследованию разных областей пространства поиска и избеганию заикливания в локальных оптимумах; принятие «худших» решений; и постепенное уменьшение вероятности принятия «худших» решений, которое происходит за счёт процесса «охлаждения», позволяя вначале исследовать большое пространство поиска, постепенно сужая его, что способствует сбалансированному получению эффективных решений. Достоинства: малое число внешних параметров; высокая скорость работы; простая реализация. Недостатки: зависим от настройки параметра «температура»; плохая масштабируемость и сходимости; значительный разброс результатов; заикливается в локальных экстремумах; неэффективен для решения задач большой размерности.

Существуют следующие модификации этого алгоритма. Это адаптивный моделируемый отжиг (ASA) – создан Н. Метрополисом [8]. Относится к классу метаэвристических алгоритмов оптимизации. Он основан на реализации двух процессов отжига металла и адаптивного поиска при решении задач оптимизации. Еще одной модификацией является квантовый отжиг (QA), создан Т. Кадоваки и Х. Нисимори [9]. Он также основан на реализации двух процессов отжига металла и квантовых вычислениях. Достоинства: рассматривают большое пространство поиска. Недостатки: высокие вычислительные затраты.

Жадный адаптивный метод случайного поиска (GRASP) – метаэвристический алгоритм оптимизации, впервые описан в работе Feo и Resende, включает в себя комбинацию жадного подхода и случайного поиска [10]. Достоинства: прост в реализации при решении задач комбинаторной оптимизации, позволяет получать результаты за полиномиальное время. Недостатки: неприменим для задач с множеством переменных; требует множество итераций.

Метод ветвей и границ – предложен Лендом и Дойгом [11], эффективен для решения задач дискретной оптимизации, предполагает наличие конечного множества допустимых решений к перебору и выбору наилучшего из них. Здесь сначала формируется «дерево поиска», состоящее из ветвей и границ. В качестве ограничений для уменьшения вычислительной сложности алгоритма вводятся границы, учитывающие глубину и ширину поиска, причём подмножества верхних границ больше нижних исключают из рассмотрения. Данный метод позволяет получать оптимальные решения. Достоинства: позволяет отсекал «неперспективные» узлы за счёт анализа матрицы расстояний; простая реализация; возможность параллельной обработки. Недостатки: высокая сложность; медленная скорость; без отсечения и установления границ данный метод в основном используется только для решения задач малой размерности.

Табуированный поиск (TS) (либо поиск с запретами) – метаэвристический алгоритм, создан Фредом У. Гловером в 1986 году [12], применим для решения задач комбинаторной оптимизации, требующих оптимального упорядочения и выбора параметров. Табуированный поиск (TS) имеет ряд общих черт с имитацией отжига [7] и методом градиентного спуска с памятью [13]. Здесь на начальном этапе поиска случайным образом генерируется решение, для которого создается список оцененных соседних решений. Далее выполняются операции аспирации (включение в запрещённый список решений в окрестности табуированного) и диверсификации (вносящая элемент случайности в про-

цесс поиска). Поиск прекращается после выполнения заданного количества итераций либо получено решение ЦФ, которого не улучшается. Достоинства: позволяет осуществлять результативный поиск за счет динамического изменения *tabu*-правил; гибкость и адаптация под различные типы задач оптимизации. Недостатки: сложность настройки параметров; время выполнения.

Биоинспирированные алгоритмы – динамично развивающийся и перспективный класс методов оптимизации, вдохновленных природными системами такими как: эволюция и поведение живых организмов [14, 15]. Данный класс алгоритмов относится к метаэвристическим алгоритмам поиска. Каждая метаэвристика данного алгоритма (пчелы, светлячки, бактерии, кроты и др.) обладает определёнными наборами признаков, либо критериев, подходящих для решения конкретных задач, с которыми она справляется наилучшим образом. Все особи характеризуются следующими свойствами: автономность, коммуникабельность, ограниченность, а также процедурами адаптации и самоорганизации, присущие живым системам. В этих методах сначала формируется начальная популяция особей, с учетом покрытия по возможности всей области поиска. Фиксируется их первоначальное положение с расчетом ЦФ, затем происходит их миграция в новое расположение с перерасчетом ЦФ и принимается лучшее из найденных положений особей. Поиск продолжается итерационно до выполнения критерия «останова». Заметим, что данные методы обладают модульной структурой, что позволяет легко осуществлять их модификацию, распараллеливание, а также проводить их интеграцию, гибридизацию и комбинирование [15]. Достоинства: эффективны для решения задач большой размерности, адаптивны, легко распараллеливаются, применимы в областях: оптимизация параметров, принятия решений, обучение нейронных сетей, робототехника, логистика и др. Недостатки: большое количество настроечных параметров поиска; неэффективны при решении задач малой размерности; стандартные алгоритмы могут заикливаться в локальных оптимумах. Рассмотрим данный класс методов более подробно.

Методы эволюционного моделирования. Генетический алгоритм (GA) – метаэвристический метод поиска, предложен Джоном Холландом и его коллегами, основанный на моделях эволюции и случайного поиска [14–18]. Алгоритм использует дискретную структуру, память, а также основан на реализации следующих операторов: кроссинговер (скрещивание), селекция, мутация и ее модификации, а также отборе «наилучших» решений. В настоящее время эффективно применяется для решения задач распознавания образов, настройки и обучения нейронных сетей, аппроксимации функций, а также для задач многокритериальной и комбинаторной оптимизации. Эффективность данного алгоритма зависит от принципов формирования начальной популяции альтернативных решений, рассматриваемой задачи, способа представления, выбора операторов преобразования, а также реализации механизмов отбора решений. Работа алгоритма состоит из последовательности циклов выполнения операторов преобразований с определенной вероятностью [17]. Далее строится целевая функция рассматриваемой оптимизационной задачи. Затем реализуются генетические операторы с учетом ограничений и граничных условий решаемой задачи. На третьем этапе осуществляют отбор лучших решений согласно значениям их ЦФ. Алгоритм прекращает свою работу по достижении одного из 3-х условий: первый – заданного количества поколений; второй – время на реализацию; третий – достигнут ожидаемый результат решения задачи. Достоинства: быстрый; прост в реализации; эффективен для решения задач большой размерности; позволяет избегать локальных оптимумов; легко распараллеливается; гибкость и адаптация под различные типы задач оптимизации. Недостатки: неэффективен для применения в случае оптимизации функции, требующей большого времени на вычисление, а также для изолированных функций; результаты применения алгоритма ограничиваются тем, какие настройки использованы для реализации генетических операторов скрещивания, мутации и селекции; может быть трудоемким при выполнении многократных вычислений для некоторого класса задач.

Дифференциальная эволюция (DE) – метаэвристический алгоритм оптимизации, предложен Сторном и Прайсом в 90-х годах [19]. В основе алгоритма дифференциальной эволюции используется популяция векторов, не требует знаний градиента, способна посредством мутации и скрещивания создавать новые решения. В данном алгоритме поиск осуществляется на основе популяции векторов (набора альтернативных решений рассматриваемой задачи) и реализации операторов мутации и скрещивания. Здесь, как и в генетическом алгоритме, создаётся случайным образом популяция векторов. Далее сначала реализуется оператор мутации, позволяющий исследовать все пространство поиска за счет сравнения каждого двух векторов из популяции и построения нового из них путём добавления разницы между ними. Затем реализуется оператор скрещивания полученных после мутации векторов с родительскими для получения новых комбинированных решений. Далее производится оценка векторов и замена «худших» решений на «лучшие» с точки зрения значения ЦФ. Поиск продолжается итерационно до выполнения критерия «останова». Достоинства: быстрый; хорошая масштабируемость; прост в реализации; эффективен для решения широкого класса оптимизационных задач; обладает хорошей сходимостью; эффективен для решения задач большой размерности; небольшое количество внешних параметров. Недостатки: риск застревания в локальных экстремумах (в случае вырождения популяции); очень высокий разброс результатов.

Методы, основанные на роевом интеллекте. Роевой интеллект – описывает имитацию коллективного поведения самоорганизующихся систем живых организмов, взаимодействующих между собой как на локальном уровне, так и с окружающей средой, осуществляя обмен информацией для достижения всех целей. Все особи в рое обладают особенностями такими как: автономность, стохастичность, коммуникабельность, ограниченность, децентрализация, адаптация и самоорганизация [14, 15, 18, 20]. На основе роевого интеллекта предложено много метаэвристик [15, 18], рассмотрим подробнее основные из них.

Метод роя частиц (PSO) – разработан инженером-электриком Расселом К. Эберхартом и социальным психологом Джеймсом Кеннеди в 1995 году [21], относится к метаэвристическим алгоритмам оптимизации, моделирует коллективное поведение популяции частиц в пространстве поиска, каждая из которых обладает: координатами, скоростью перемещения и ускорением. Работа (PSO), следующая: в начале происходит инициализация популяции частиц с заданными векторами скорости, расположенная по всей области поиска случайным образом. Далее вычисляется значение ЦФ каждой частицы, при этом каждая из них обладает памятью, и информацией о наиболее приоритетных точках исследуемого пространства поиска. Затем происходит обновление положения и скорости частиц.

После этого производится корректировка текущей скорости частиц, отражающая её абсолютную величину и направление к новому, предположительно лучшему, решению/позиции. Далее поиск продолжается итерационно до выполнения условия завершения. В конце каждой итерации частицы роя осуществляют оценку пригодности каждой частицы и по всей популяции. Заметим, что одной из важных процедур в алгоритме является коррекция скорости, так, как от нее зависит сходимость алгоритма. Достоинства: прост и эффективен; низкая алгоритмическая сложность в реализации; эффективен для решения задач большой размерности; возможность эффективного разделения на параллельную обработку; хорошо работает с гладкими функциями. Недостатки: необходима тщательная настройка параметров алгоритма при решении задач большой размерности для получения результатов, близких к оптимальным; непригоден для оптимизации дискретных функций.

Алгоритм муравьиной колонии (ACO) – метаэвристический метод оптимизации, предложен Марко Дориго в 1992 году [14, 15, 18, 22]. В основе алгоритма рассматривается модель роевого интеллекта, представляющая собой имитацию

поведения муравьиной колонии в поисках пищи с учетом самоорганизации и взаимодействия. Взаимодействие особей происходит путём прямого обмена информацией (химический, визуальный контакт) и непрямого (стигмергии) [22]. Модель основана на способностях муравьев быстро находить кратчайшие пути и адаптироваться к изменяющимся внешним условиям. В данном алгоритме каждый муравей имеет начальный, промежуточный и конечный маршрут, а также способен хранить информацию о своём соб-

ственном пути. Проходя по маршруту, муравьи помечают его специальным веществом – феромоном. Это вещество используется в качестве коммуникации между муравьями. Максимальная концентрация феромонов на маршруте определяет приоритет выбора кратчайшего пути. Достоинства: быстрый; универсален для разных задач оптимизации; эффективен для решения задач большой размерности; исключает заикливание в локальных оптимумах; хорошая сходимость как для гладких, так и дискретных функций; масштабируем. Недостатки: требуется большее число итераций для сходимости; большое влияние настроечных параметров алгоритма на получении результата.

Алгоритм искусственной пчелиной колонии (ABC) – метаэвристический метод оптимизации, используется для дискретных (комбинаторных) и оптимизационных задач. Впервые предложен турецким учёным Дервишем Карабога в 2005 году [14, 15, 18, 23]. В основе алгоритма рассматривается модель роевого интеллекта, представляющая собой имитацию поведения колонии медоносных пчел при сборе нектара в живой природе. Здесь пчёлы делятся на три группы рабочие пчёлы, пчёлы-исследователи, пчёлы-разведчики [21]. В начале работы алгоритма формируется начальная популяция пчёл, которая сортируется в зависимости от целевой оценки исследуемых участков. Пчёлы-разведчики вылетают из улья в случайном направлении, обрабатывают достаточно большую площадь участков, осуществляют поиск нектара, возвращаются в улей и сообщают остальному пчелиному окружению (исследователям и рабочим пчёлам) всю полученную информацию о найденном местоположении и уровне качества нектара посредством уникального импровизированного танца. Рабочие пчёлы и исследователи оценивают всю полученную информацию о нектаре, осуществляют выбор элитных участков, а также их окрестностей и направляются к ним, выполняя свои роли: рабочие пчёлы осуществляют сбор нектара, а пчёлы-исследователи – исследуют окрестности этих участков. Работающая пчела, отказавшаяся от источника пищи, приобретает статус «разведчица» и приступает к поискам нового источника пищи. В данном алгоритме источник пищи выступает в роли возможного решения задачи оптимизации, а количество нектара – целевой функции соответствующего решения. При этом количество занятых пчел равна числу решений в популяции. Работа алгоритма зависит от таких настроечных параметров как: число рабочих пчел и разведчиков, число элитных и других участков, их размера, а также заданного числа итераций [15, 18]. Достоинства: быстрое разбиение пространства поиска на области с высокими значениями ЦФ, адаптивен; легко распараллеливается; эффективен для решения задач большой размерности; быстрый; достаточно быстрая сходимость с малым количеством данных. Недостатки: сильное влияние настроек параметров алгоритма на результат; не универсален; средние показатели масштабируемости.

Алгоритм светлячков (FA) – метаэвристический метод оптимизации, моделирует поведение жуков – лампирид (светлячков) в природе в процессе спаривания. Реализация этого процесса, основана на выделении специального вещества люциферина, отвечающего за яркость свечения. Впервые данный алгоритм светлячков был предложен Синь-Шэ Янгом в 2007 году для решения задач непрерывной и дискретной оптимизации [14, 15, 18, 24]. В начале работы алгоритма формируется начальная популяция светлячков с заданным уровнем люциферина (значение ЦФ), которая распределяется во всем пространстве поиска. В алгоритме помимо уровня свечения также учитывается расстояние между светлячками. Данные процессы реализуются на основе вероятностных механизмов [15]. Поиск продолжается итерационно до выполнения критерия «останова». Достоинства: прост в реализации; легко модифицируется; способен производить кластеризацию области пространства поиска на отдельные группы вокруг локальных экстремумов; легко распараллеливается; высокая масштабируемость; эффективен для решения задач большой размерности. Недостатки: сильное влияние настроек параметров алгоритма на результат; медленно сходится и легко попадает в ловушку локального экстремума для мультимодальных задач; необходим подбор коэффициентов, параметрически зависящих от текущей итерации.

Алгоритм стрекозы (DA) – метаэвристический метод оптимизации, предложен С. Мирджалили в 2016 году [25]. В основе данного алгоритма статистическое и динамическое роевое поведение стрекоз в природе. Стрекозы образуют подгруппы, совершают полёты над различными областями, разведывают подходящие места в поисках наилуч-

ших источников пищи (решений). Работа алгоритма имитации движения стрекозы начинается с «разделения» – отделения особи от роя и задания им определенной скорости движения. Далее начинается процесс «выравнивания» скоростей особей в паре, а в итоге происходит процесс «сплочённости», и движения к центру. Поскольку итоговая цель роя – выжить, все особи должны быть привлечены к поиску источников пищи и обезопасить себя от потенциальных хищников. В данном алгоритме реализуется пять механизмов поведения особей в рое: разделение, выравнивание, сплоченность, привлечение и отвлечение. По завершении генерации популяции особей на каждой итерации вычисляют показатель целевой функции (ЦФ), определяют коэффициенты, а следом – поведенческие шаблоны, вектора скорости и позиции каждой особи. Достоинства: эффективен для решения широкого спектра проблем оптимизации; прост в реализации; эффективно модифицируется и распараллеливается. Недостатки: низкая скорость сходимости.

Алгоритм интеллектуальных капель воды (IWD) – метаэвристический метод оптимизации, предложен иранским учёным Хамедом Шах-Хоссейни в 2007 году [26]. Данный алгоритм создан на основе модели роевого интеллекта, моделирует динамику речных систем. Другими словами, осуществляет поиск путей к наименьшему сопротивлению при течении по неровной поверхности, адаптирован для решения задач комбинаторной оптимизации, таких как задачи маршрутизации, планирования и т.д. Здесь каждая капля представляет собой решение, а взаимодействие нескольких искусственных капель воды способствует изменению своего окружения, обнаруживая оптимальный путь по пути наименьшего сопротивления. Достоинства: эффективен для решения задач большой размерности, легко распараллеливается, комбинирует локальный и глобальный поиск. Недостатки: низкая сходимость.

Методы, вдохновленные флорой и фауной. Алгоритм оптимизации на основе искусственной экосистемы (АЕО) – метаэвристический метод оптимизации, предложен в 2019 году Чжао и др. [27]. В основе алгоритма рассматривается модель взаимодействия между компонентами экосистемы (хищники, травоядные и всеядные) такими как: производство; потребление; разложение. Работа алгоритма начинается с «инициализации», представляющей создание начальной популяции решений (экосистему). Далее выполняется процесс «производства» (на каждой итерации происходит обновление начального решения, учитывая при этом лучший и случайный фактор). После реализуется процесс «потребления», в ходе которого все оставшиеся решения подлежат обновлению на основе трёх стратегий: травоядных – на основе производителя; хищники – на основе случайно выбранного лучшего решения; а всеядные предполагают выбор: как производителя, так и случайного решения. По завершении процесса «потребления» наступает процесс «разложения», что способствует улучшению поиска. Итоговым процессом выступает механизм «отбора», предполагающий сохранение только наилучших решений, что обеспечивает эффективность экосистемы в целом. Достоинства: эффективен для решения широкого спектра проблем оптимизации; баланс между исследованием и эксплуатацией; небольшое количество внешних параметров; исключает закливание в локальных оптимумах; прост и адаптивен в реализации; показывает хорошие результаты на дискретных функциях большой размерности. Недостатки: низкая скорость и точность сходимости; заметные задержки при переходе от одного процесса к другому.

Алгоритм африканских буйволов (АВО) – метаэвристический метод, предложен в 2015 году учеными Джулиусом Бенеолучи Одили и Мохдом Низамом Кахаром [28]. В основе данного метода лежит модель поведения и образа жизни африканских буйволов в природе, включая их социальное взаимодействие и стратегии выживания. Им присущ: коллективный образ жизни в крупных стадах, сезонная миграция, забота о потомстве, слаженная и совместная координация при поиске пищи, воды и защиты от хищников. В период осуществления миграций буйволы используют эффективные стратегии поиска ресурсов и избегания опасностей. Ключевыми принципами алгоритма являются: во-первых, «коммуникация» (обмен информацией посредством звуковых сигналов), а во-вторых, «обучение» буйволов как на собственном опыте, так и на опыте других особей стада. Данный процесс

реализован в алгоритме как обновление позиций особей на основе собранной информации. Работа алгоритма, как и других методов биоинспирированной оптимизации, начинается с инициализации популяции буйволов со случайными позициями в пространстве поиска при этом каждый буйвол является потенциальным решением рассматриваемой задачи. Далее осуществляют оценку каждого решения (положения буйвола). В случае, если значение ЦФ текущего положения буйвола лучше, чем его предыдущее значение, то эта позиция сохраняется. Затем происходит обновление позиций буйволов на основе реализации двух главных механизмов «остаться и эксплуатировать» и «двигаться и исследовать», что способствует оптимизации поиска источников пищи, а также выявлению лучшего положения конкретного буйвола из всей стаи. Алгоритм завершает работу по достижению критерия останова и выводит вектор положения, являющийся лучшим найденным решением для поставленной задачи. Достоинства: эффективен для решения широкого спектра проблем оптимизации; прост и эффективен; адаптивен; быстрый; мало внешних настроечных параметров. Недостатки: высокий разброс результатов на функциях малой размерности; отсутствуют механизмы выхода из локальных «ям».

Инвазивный алгоритм сорняков (IWO) – метаэвристический метод оптимизации, предложен Мехрабианом и Лукасом в 2006 году [29]. Этот метод моделирует колонизирующее поведение сорняков в природе, рост, размножение, распространение и борьбу за выживание, обладает высокой надёжностью и адаптивностью, может эффективно сходиться к оптимальному решению проблемы. Отличительной особенностью модели является гарантированный высев семян всеми без исключения растениями колонии, предоставляя возможность даже самым плохо приспособленным из них оставлять потомство. Работа алгоритма начинается с инициализации посева семян по случайным позициям в пространстве поиска. Далее происходит разброс и пророст семян образуя взрослые растения (потенциальное решение рассматриваемой задачи) на «поле» пространства поиска, которые оцениваются функцией приспособленности. Затем, зная приспособленность каждого растения, осуществляют их размножение посредством семян, количество которых прямо пропорционально их приспособленности. После этого проросшие семена объединяют с родительскими растениями и сортируют их, выбирая лучшие на основании значения ЦФ. Работа алгоритма продолжается итерационно, пока не будет выполнено условие останова. Достоинства: эффективен для решения широкого спектра проблем оптимизации; устойчив; адаптивен; прост в реализации; эффективно модифицируется и распараллеливается. Недостатки: существует вероятность застревания в локальных экстремумах; производительность поиска на протяжении всей оптимизации неравномерная; очень много настроечных параметров.

На основе проведённого анализа выявлено, что метаэвристические методы и алгоритмы поиска эффективны для решения NP-сложных и NP-трудных задач оптимизации, к которым относится задача трёхмерной упаковки так, как позволяют избегать закливания в локальных областях и получать наборы квазиоптимальных решений за полиномиальное время.

Вычислительный эксперимент. Оценка эффективности алгоритмов оптимизации является сложной задачей и должно учитывать следующие условия: наличие большого числа тестовых примеров и возможности их сравнения на основе стандартных критериев [30].

Для проведения вычислительного эксперимента рассмотрены известные тестовые функции табл. 1 и рис. 2, основными характеристиками в которых являются: известная точка глобального экстремума, специфика оптимизируемой функции ее размерность и число экстремумов.

При исследовании использовались следующие показатели, такие как время работы и значение ЦФ. Результаты вычислительного эксперимента сведены в табл. 2 и проиллюстрированы на графиках рис. 3 и 4.

Таблица 1

Тестовые функции

Название функции	Формула функции	Область	Глобальный минимум
1	2	3	4
Sphere Function (F1)	$F(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$[-5; 5]$	$F(0,0,\dots,0) = 0$
Rosenbrock's Valley Function (F2)	$F(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{n-1} 100 \times (x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2$	$[-2; 2]$	$F(1,1,\dots,1) = 0$
Step Function (F3)	$F(\vec{x}) = 6 \times n + \sum_{i=1}^n x_i $	$[-5; 5]$	$F((-5,12; 5,0), \dots) = 0,0$ $F(\dots, (-5,12; 5,0)) = 0,0$
Rastrigin's Function (F4)	$F(\vec{x}) = 10 \times n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \times \cos(2\pi x_i))$	$[-5,12; 5,12]$	$F(0,0,\dots,0) = 0$

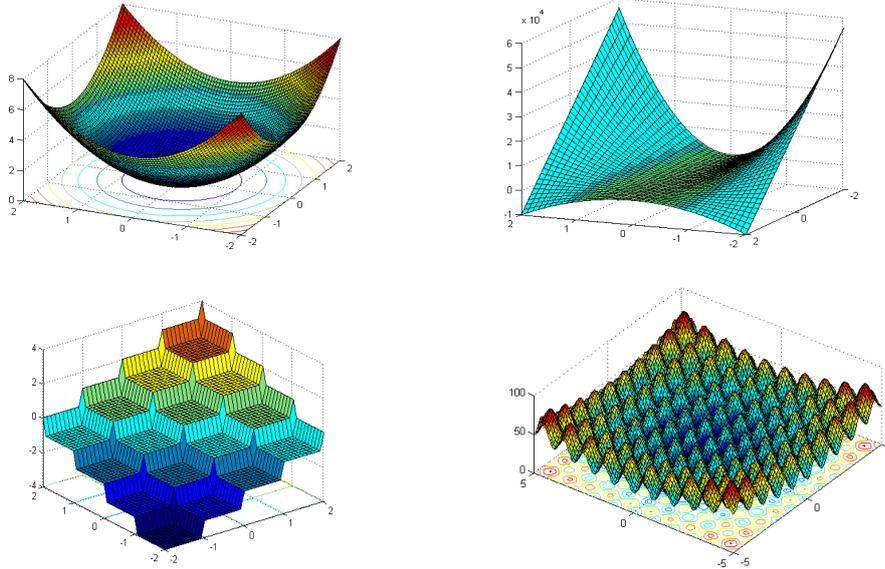


Рис. 2. Тестовые функции

Таблица 2

Вычислительный эксперимент

№	GA		FA		ABC		PSO		SA	
	Время, с	Отклонение								
F1	8,73	0,59	11,30	0,43	10,39	0,47	12,41	0,50	15,21	0,78
F2	9,56	0,67	12,53	0,42	11,74	0,48	12,71	0,58	14,87	0,84
F3	8,78	0,73	12,84	0,49	11,90	0,50	13,00	0,68	14,24	0,83
F4	9,19	0,98	12,01	0,52	11,09	0,63	13,26	0,75	14,81	1,03

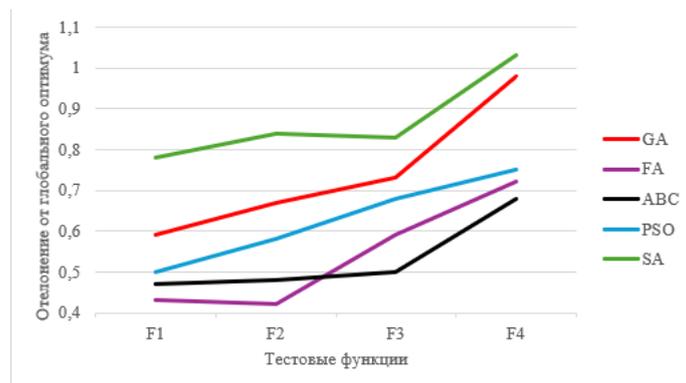


Рис. 3. График зависимости значения ЦФ от тестовой функции

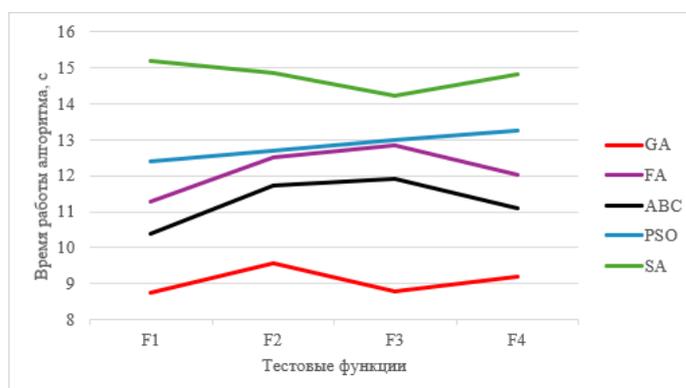


Рис. 4. График зависимости времени решения от тестовой функции

На основе анализа проведенных исследований можно сделать вывод, что по времени решения данные методы сопоставимы, а по качеству получения результата роевые методы позволяют получать лучшие решения в среднем на 5%.

Заключение. В данной статье проанализированы проблемы морских грузоперевозок, нацеленных на осуществление транспортирования больших объемов различных грузов. Рассмотрена задача трёхмерной упаковки при морских грузоперевозках. Предлагается данную задачу декомпозировать на 4 этапа: упаковка груза на паллеты, упаковка груза с паллетами в контейнер и размещение контейнеров на палубу и в трюм корабля. Приведены критерии и ограничения, построена модифицированная комбинированная многокритериальная целевая функция. Также, в работе проведён краткий обзор и анализ методов и алгоритмов задачи трёхмерной упаковки, выявлены их особенности, достоинства и недостатки. Проведен вычислительный эксперимент, показавший преимущество роевых методов оптимизации. С учётом проведённого анализа отмечено, что метаэвристические методы и алгоритмы поиска эффективны для решения NP-сложных и NP-трудных задач, в частности задачи трёхмерной упаковки так, как позволяют избежать закливания в локальных областях и получать наборы квазиоптимальных решений за полиномиальное время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 53350-2009 (ISO 668:1995) Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса (дата введения 2010-01-01).
2. ГОСТ 26653-2015 Подготовка генеральных грузов к транспортированию. Общие требования (дата введения 2017-03-01).
3. ISPM 15 Фитосанитарный стандарт (дата введения 2002-03).

4. Курейчик В.В., Глуценко А.Е., Орлов А.Н. Гибридный подход для решения задачи 3-хмерной упаковки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 6 (179). – С. 45-51.
5. Луцан М.В., Нужнов Е.В. Решение задачи трехмерной упаковки с палетированием контейнеров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 196-204.
6. Mladenović N., Hansen P. Variable neighborhood search // Computers & Operations Research. – 1997. – Vol. 24. – P. 1097-1100.
7. Куркпатрик С. Гелат-младший К.Д. Викки М.П. Оптимизация с помощью имитации отжига // Наука. – 1983. – 220. – С. 671-680.
8. Nicholas Metropolis, Arianna W. Rosenbluth, Mar - shall N. Rosenbluth, Augusta H. Teller, Edward Teller. Equation of state calculations by fast computing machines // Journal of Chemical Physics. – 1953. – Vol. 21, No. 6. – P. 1087-1092.
9. Kadowaki T., Nishimori H. Quantum annealing in the transverse Ising model // Phys. Rev. E. – 1998. – Vol. 58, No. 5. – P. 5355-5363.
10. Resende M.G., Ribeiro C. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures: Advances and Extensions // Published in Handbook of Metaheuristics. – 2018. – Vol. 272. – P. 169-220.
11. Land A.H., and Doig A.G. An automatic method of solving discrete programming problems // Econometrica. – 1960. – Vol. 28. – P. 497-520.
12. Fred Glover. Tabu Search – Part 1 // ORSA Journal on Computing. – 1989. – Vol. 1, No. 3. – P. 190-206.
13. Suganya M., Sasipraba T. Stochastic Gradient Descent long short-term memory based secure encryption algorithm for cloud data storage and retrieval in cloud computing environment // Journal of Cloud Computing. – 2023. – Vol. 12. – P. 1-17.
14. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновлённые природой: учеб. пособие. – 3-е изд., испр. – М.: Изд-во: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2021. – 446 с.
15. Гладков Л.А., Кравченко Ю.А., Курейчик В.В., Родзин С.И. Интеллектуальные системы: Модели и методы метаэвристической оптимизации: монография. – Чебоксары: Среда, 2024. – 228 с.
16. Holland, John H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Application to Biology, Control, and Artificial Intelligence. – USA: University of Michigan. 1975. – 183 p.
17. Kureichik V.M., Malioukov S.P., Kureichik V.V., Malioukov A.S. Genetic algorithms for applied CAD problems. – Berlin, 2009.
18. Курейчик В.В. Родзин С.И. Вычислительные модели эволюционных и роевых биоэвристик (обзор) // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 10. – С. 507-520.
19. Storn R., Price K. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces // Journal of Global Optimization. – 1997. – Vol. 11, No. 4. – P. 341-359.
20. Hassanién E., Emary E. Swarm Intelligence: Principles Advances, and Applications. – CRC Press: 2015. – 228 p.
21. Kennedy J., Eberhart R.C. Particle swarm optimization // In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942-1948.
22. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating objects // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. – 1996. – Part B. – Vol. 26, No. 1. – P. 29-41.
23. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. – Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005. – 110 p.
24. Xin-She Yang. Firefly algorithms for multimodal optimization // In International symposium on stochastic algorithms. – 2009. – P. 169-178.
25. Mirjalili S. Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems // Neural Computing and Applications. – 2016. – Vol. 27. – P. 1053-1073.
26. Hamed Shah-Hosseini. Intelligent water drops algorithm: a new optimization method for solving the multiple knapsack problem // International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics. – 2008. – Vol. 1, No. 2. – P. 193-212.
27. Zhao W., Wang L., Zhang Z. Artificial ecosystem-based optimization: a novel nature-inspired meta-heuristic algorithm // In: Neural Computing and Applications. – 2020. – Vol. 32, No. 13. – P. 9383-9425.
28. Odili J.B., Kahar M.N.M. African Buffalo Optimization: A Swarm-Intelligence Technique // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 76. – P. 443-448.
29. Mehrabian A.R., Lucas C.A. Novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization // Ecological Informatics. – 2006. – Vol. 1, No. 4. – P. 355-366.
30. Пантелеев А.В., Метлицкая Д.В., Алешина Е.А. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы. – М.: Вузовская книга, 2013. – 244 с.

REFERENCES

1. GOST R 53350-2009 (ISO 668:1995) Konteynery gruzovye serii 1. Klassifikatsiya, razmery i massa [GOST R 53350-2009 (ISO 668:1995) Series 1 freight containers. Classification, dimensions and weight] (date of introduction 2010-01-01)].
2. GOST 26653-2015 Podgotovka general'nykh gruzov k transportirovaniyu. Obshchie trebovaniya [GOST 26653-2015 Preparation of general cargo for transportation. General requirements] (date of introduction 2017-03-01).
3. ISPM 15 Fitosanitarnyy standart [ISPM 15 Phytosanitary standard] (date of introduction 2002-03).
4. Kureychik V.V., Glushchenko A.E., Orlov A.N. Gibridnyy podkhod dlya resheniya zadachi 3-khmernoy upakovki [Hybrid approach for solving the problem of 3-dimensional packaging], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 6 (179), pp. 45-51.
5. Lutsan M.V., Nuzhnov E.V. Reshenie zadachi trekhmernoy upakovki s paletirovaniem konteynerov [Solution of the problem of three-dimensional packaging with palletizing of containers], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 196-204.
6. Mladenović N., Hansen P. Variable neighborhood search, *Computers & Operations Research*, 1997, Vol. 24, pp. 1097-1100.
7. Куркпатрик С. Гелат-младший К.Д. Вукки М.П. Оптимизация с помощью имитации отжига // Наука. – 1983. – 220. – С. 671-680.
8. Nicholas Metropolis, Arianna W. Rosenbluth, Mar - shall N. Rosenbluth, Augusta H. Teller, Edward Teller. Equation of state calculations by fast computing machines, *Journal of Chemical Physics*, 1953, Vol. 21, No. 6, pp. 1087-1092.
9. Kadowaki T., Nishimori H. Quantum annealing in the transverse Ising model, *Phys. Rev. E*, 1998, Vol. 58, No. 5, pp. 5355-5363.
10. Resende M.G., Ribeiro C. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures: Advances and Extensions, *Published in Handbook of Metaheuristics*, 2018, Vol. 272, pp. 169-220.
11. Land A.H., and Doig A.G. An automatic method of solving discrete programming problems, *Econometrica*, 1960, Vol. 28, pp. 497-520.
12. Fred Glover. Tabu Search – Part 1, *ORSA Journal on Computing*, 1989, Vol. 1, No. 3, pp. 190-206.
13. Suganya M., Sasipraba T. Stochastic Gradient Descent long short-term memory based secure encryption algorithm for cloud data storage and retrieval in cloud computing environment, *Journal of Cloud Computing*, 2023, Vol. 12, pp. 1-17.
14. Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern algorithms for search engine optimization. Algorithms inspired by nature: a tutorial]. 3rd. ed. Moscow: Izd-vo: MGTU im. N.E. Bauman. 2021, 446 p.
15. 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: Sreda, 2024, 228 p.
16. Holland, John H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Application to Biology, Control, and Artificial Intelligence. USA: University of Michigan. 1975, 183 p.
17. Kureichik V.M., Malioukov S.P., Kureichik V.V., Malioukov A.S. Genetic algorithms for applied CAD problems. Berlin, 2009.
18. Kureychik V.V. Rodzin S.I. Vychislitel'nye modeli evolyutsionnykh i roevykh bioevristik (obzor), *Informatsionnye tekhnologii*, 2021, Vol. 27, No. 10, pp. 507-520.
19. Storn R., Price K. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *Journal of Global Optimization*, 1997, Vol. 11, No. 4, pp. 341-359.
20. Hassanien E., Emary E. Swarm Intelligence: Principles Advances, and Applications. CRC Press: 2015, 228 p.
21. Kennedy J., Eberhart R.C. Particle swarm optimization, *In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995, Vol. 4, pp. 1942-1948.
22. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating objects, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1996, Part B, Vol. 26, No. 1, pp. 29-41.
23. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005, 110 p.
24. Xin-She Yang. Firefly algorithms for multimodal optimization, *In International symposium on stochastic algorithms*, 2009, pp. 169-178.
25. Mirjalili S. Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems, *Neural Computing and Applications*, 2016, Vol. 27, pp. 1053-1073.

26. *Hamed Shah-Hosseini*. Intelligent water drops algorithm: a new optimization method for solving the multiple knapsack problem, *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2008, Vol. 1, No. 2, pp. 193-212.
27. *Zhao W., Wang L., Zhang Z.* Artificial ecosystem-based optimization: a novel nature-inspired meta-heuristic algorithm, *In: Neural Computing and Applications*, 2020, Vol. 32, No. 13, pp. 9383-9425.
28. *Odili J.B., Kahar M.N.M.* African Buffalo Optimization: A Swarm-Intelligence Technique, *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 76, pp. 443-448.
29. *Mehrabian A.R., Lucas C.A.* Novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization, *Ecological Informatics*, 2006, Vol. 1, No. 4, pp. 355-366.
30. *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, 244 p.

Курейчик Владимир Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: vkur@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Балясова Юлия Владимировна – e-mail: baliasova@sfedu.ru; тел.: +79185774576; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; аспирант.

Бова Виктория Викторовна – e-mail: vvbova@yandex.ru; тел.: 88634371651 кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; доцент.

Kureichik Vladimir Victorovich – Southern Federal University; e-mail: vkur@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; head of department; dr. of eng. sci.; professor.

Balyasova Yulia Vladimirovna – e-mail: baliasova@sfedu.ru; phone: +79185774576; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; graduate student.

Bova Victoria Victorovna – e-mail: vvbova@yandex.ru; phone: +78634371651; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; associate professor.

УДК 007.52

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-29-42

Е.А. Назаров, М.Е. Данилин, Е.Ю. Косенко

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

В статье рассматривается математическое обоснование алгоритма построения маршрута для обеспечения движения мобильного робототехнического комплекса (РТК) в процессе следования за оператором при решении задач автономного управления с использованием технологий искусственного интеллекта (ИИ). Представлен подход к реализации задачи обеспечения автономности следования мобильного РТК за оператором по принципу «следуй за мной». В качестве основного метода выбран метод погони, обеспечивающий следование РТК за ведущим оператором на заданном расстоянии. Моделирование движения РТК вслед за оператором осуществляется в сопровождающей системе координат для более корректного описания движения материальной точки по криволинейной траектории. В качестве исходных данных используются два динамических массива чисел, включающих в себя информацию о расстоянии от видеокамеры РТК до ведущего оператора и о величине курсового угла между продольной осью комплекса и линией визирования. Построение маршрута осуществляется с запозданием, после того как ведущий оператор условно сделал один шаг в направлении от робота. Введение нечеткости в процесс управления подразумевает оценивание воздействий и реакций совокупностью термов, которые сопоставляются с некоторой степенью уверенности с определенными интервалами каких-либо физических величин. На основе предлагаемого подхода разработан алгоритм, который реализован в программной среде Python с использованием библиотеки встроенных функций для работы с аппаратом нечеткой логики Skfuzzy. Для оценивания точности реализации целевой функции проведено

имитационное моделирование. Анализ полученных результатов позволил выявить основные преимущества применения нечеткой логики для решения задач автоматизации по сравнению с традиционными подходами теории автоматического управления.

Робототехнический комплекс; построение маршрута; автономное управление; искусственный интеллект; нечеткая логика; нечеткий логический вывод.

E.A. Nazarov, M.E. Danilin, E.Y. Kosenko

ALGORITHM FOR CONSTRUCTING THE ROUTE OF A ROBOTIC COMPLEX USING THE FUZZY LOGIC METHOD

This article presents the mathematical justification of a path planning algorithm for a mobile robotic complex (MRC) following an operator during autonomous control tasks using artificial intelligence (AI). A proposed approach implements a "follow me" autonomous following task for the MRC. A pursuit method is selected as the primary method, ensuring the MRC follows the leading operator at a specified distance. The MRC's movement simulation is performed in a moving coordinate system to more accurately describe the movement of a material point along a curvilinear trajectory. The input data consists of two dynamic arrays containing information about the distance from the MRC's camera to the leading operator and the course angle between the complex's longitudinal axis and the line of sight. Path planning is performed with a delay, after the leading operator has conditionally taken one step away from the robot. The introduction of fuzziness in the control process implies evaluating actions and reactions with a set of terms that are associated with a certain degree of confidence with specific intervals of physical quantities. Based on this approach, an algorithm was developed and implemented in the Python programming environment using the Skfuzzy library's built-in fuzzy logic functions. Simulation modeling was conducted to evaluate the accuracy of the target function implementation. Analysis of the results revealed the main advantages of using fuzzy logic for automation tasks compared to traditional approaches in automatic control theory.

Robotic complex; path planning; autonomous control; artificial intelligence; fuzzy logic; fuzzy inference.

Введение. Современные робототехнические системы представляют собой совокупность последних достижений науки, техники, а их универсальность позволяет применять их для решения самых разнообразных задач [1–4].

Успешное достижение цели роботом невозможно без использования систем автоматического управления, которые могут быть реализованы на основе различных подходов: классической теории автоматического управления [5], позиционно-траекторного управления [Там же], аппарата нечеткой логики [6–9], искусственных нейронных сетей [10–11], и т.д.

Задача обеспечения автономности следования мобильного РТК за оператором является одним из актуальных направлений исследований в современной робототехнике, т.к. несмотря на большое количество существующих решений, ни одно из них нельзя назвать универсальным. Прежде всего, следует заметить, что решение этой задачи однозначно классифицируется как технология ИИ, т.к. ее функциональное назначение очень гармонично укладывается в рамки определения этого понятия, сформулированного нормативными документами.

Так, согласно [12] технология ИИ определяется как комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами познавательной деятельности человека. Также в это определение можно добавить еще и высшее животное, например, лошадь или собаку, которым безусловно присущи когнитивные функции. Этот очевидный факт подтверждается и тысячелетней историей использования человеком в качестве транспорта обученных, вьючных животных для перевозки материальных средств.

Для мобильного робота транспортного назначения эта технология реализуется следующим образом. У оператора на одежде со стороны спины закрепляется ArUco-маркер [13]. Система управления с помощью видекамеры распознает метку, определяет полярные координаты ведущего и формирует команды электроприводам, обеспечивая движение вслед на заданном расстоянии.

Если рассматривать технологию ИИ как совокупность математических, алгоритмических, программных и аппаратных решений [14], интегрированных в систему управления мобильного РТК, то без всякого сомнения можно сделать вывод о приоритетных значениях математической и алгоритмической составляющих, которые в аспекте функционального назначения мобильного транспортного комплекса могут именоваться алгоритмами обеспечения автономного следования за ведущим. Функциональное многообразие частных задач, выполнение которых должна обеспечить технология «Следуй за мной», позволяет представить ее совокупностью программных продуктов. Результаты декомпозиции технологии поясняются схемой, показанной на рис. 1.

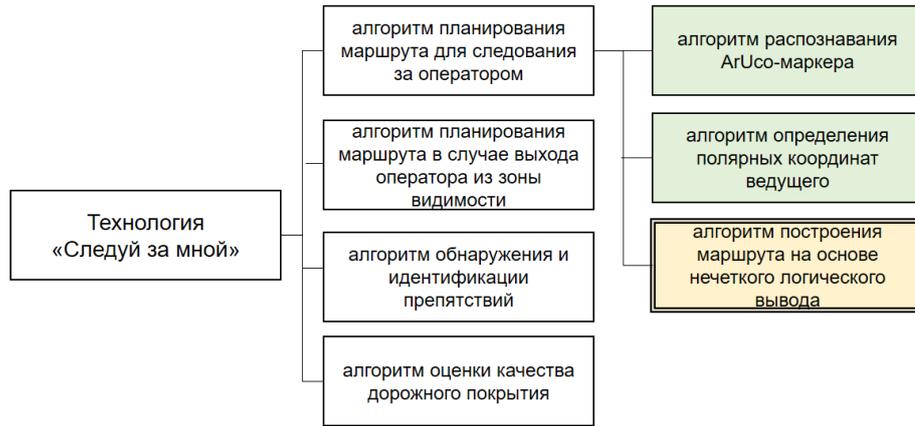


Рис. 1. Схема, поясняющая состав технологии «Следуй за мной»

Первое место в комплексе технологических решений однозначно отводится алгоритму планирования маршрута, который, в свою очередь, также представлен совокупностью частных алгоритмов. Для улучшения качества управления внедрение технологии ИИ в систему управления транспортного РТК видится путем применения аппарата нечеткой логики для решения задачи построения маршрута. Основанием для этого служит тот факт, что классификационный признак «методы обработки информации» национального стандарта [15] относит систему с «нечеткими знаниями» к категории систем ИИ.

Формулировка задачи и обзор методов преследования. Возвращаясь к первой составляющей в определении технологии ИИ [14, 27], а точнее к математическому решению, которое должно основываться на хорошо апробированном аппарате теории поиска и преследования движущихся объектов. Само понятие преследования с кинематической точки зрения рассматривается как сближение управляемой системы с некоторой подвижной целью. По ходу приближения система управления преследователя формирует управляющее воздействие на основе текущей информации о параметрах цели, характеризующих ее скорость и направление.

В настоящее время известно большое количество разнообразных алгоритмов преследования. При этом, можно однозначно констатировать отсутствие единого универсального метода, который бы обладал требуемой эффективностью для любого типа сопровождаемого объекта [16]. Результаты сравнительного анализа характеристик методов преследования обобщены в табл. 1.

Учитывая то обстоятельство, что целевой функцией разрабатываемого алгоритма является не достижение цели, а ее сопровождение, точнее следование за ведущим оператором на заданном расстоянии, то наиболее предпочтительным является выбор метода погони. Сущность этого метода поясняется на схеме (рис. 2).

Таблица 1

Сравнительные характеристики классических алгоритмов преследования

Характеристики	Методы			
	погони	постоянного угла упреждения	параллельного сближения	пропорционального сближения
направление вектора скорости преследователя	в любой момент времени направлен на цель	в любой момент времени упреждает линию визирования на постоянную величину	программный курсовой угол преследователя определяется $\varphi = \arcsin \frac{V_k \sin(\pi - \alpha)}{r}$	угловая скорость линии визирования пропорциональна угловой скорости цели
особенности	преследование только вслед, с острого догонного угла $\varphi < \pi/2$; траектория сильно искривлена.	траектория менее искривлена	прямолинейная траектория сближения	учет тенденции поворота линии визирования
достоинства	простота исходных данных	возможность сближения на встречном курсе	в случае совершения маневра нормальное ускорение для преследователя не превышает нормальное ускорение для цели	универсальность алгоритма
недостатки	преследование только тихих, не маневрирующих целей	обязательное наличие информации о знаке отклонения цели от линии визирования	необходимость постоянного обновления информации о курсовом угле и скорости цели	--

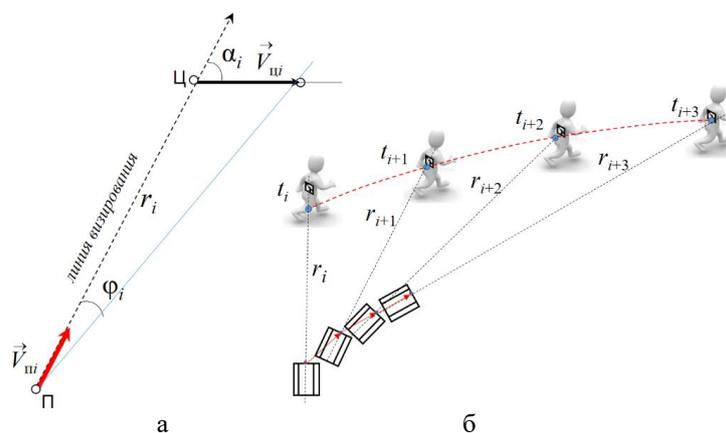


Рис. 2. Схема, поясняющая возможность применения метода погони для построения маршрута транспортного РТК

Определяющими аргументами для выбора метода погони являются его характеристики:

1. Возможность преследования тихоходных, не маневрирующих целей (людей, передвигающихся пешим порядком).

2. Немаловажную роль играет относительно не сложный математический аппарат, для пояснения принципа действия которого используются следующие обозначения (рис. 2,а):

П – преследователь (транспортный РТК);

Ц – цель (ведущий оператор);

$\vec{V}_п$ – вектор скорости преследователя;

$\vec{V}_ц$ – вектор скорости цели;

r_i – величина дистанции между преследователем и целью в момент времени t_i ;

ϕ_i – курсовой угол преследователя, т.е. угол между вектором скорости $V_п$ и линией визирования (линией «П – Ц»);

α_i – курсовой угол цели (угол между вектором скорости $V_ц$ и линией визирования).

В отличие от метода погони алгоритм планирования маршрута для мобильного РТК будет отличаться функциональным предназначением. Если в процессе преследования решается задача достижения цели, то при реализации режима «Следуй за мной» РТК должен двигаться за ведущим оператором на некотором удалении, по возможности повторяя его траекторию (рис. 2,б). Это еще один аргумент в пользу выбора метода погони в качестве базового.

Следует учесть, что если для алгоритмов преследования целевая функция формализуется как $\lim_{t \rightarrow t_{min}} r(t) = 0$, то для случая следования на расстоянии:

$$(r - \Delta_r) \leq r(t) \leq (r + \Delta_r), \quad (1)$$

где r – установленная дистанция между РТК и ведущим (в рассматриваемом случае $r = 5$ м);

Δ_r – допустимый предел изменения дистанции между РТК и оператором по ходу движения.

Разработка алгоритма планирования маршрута для следования за ведущим оператором. Моделирование движения РТК вслед за оператором предлагается осуществить в сопровождающей системе координат [17] для более корректного описания движения материальной точки по криволинейной траектории. В этой системе начало координат совмещается с видеокамерой РТК и перемещается вслед за оператором по построенному алгоритмом маршруту. В качестве исходных данных используются два динамических массива чисел, включающих в себя информацию о расстоянии от видеокамеры до ведущего оператора r и о величине курсового угла между продольной осью комплекса и линией визирования ϕ , и образующих систему:

$$\left. \begin{aligned} r &= r(t) \\ \phi &= \phi(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Данная система является также параметрической формой записи уравнения траектории движения РТК, состоящей в одновременном выполнении двух эмпирических зависимостей, детерминированных во времени.

Оценка значений функций системы (2) производится алгоритмом определения полярных координат (рис. 1) на основании результатов обработки видеоряда, поступающего с цифровой камеры. Таким образом, значения функций системы (2) обретают конкретные значения.

Обращается внимание на особенность модели движения, которую предлагается использовать для алгоритма планирования маршрута. Это – дискретизация передвижения ведущего оператора, который шагает в выбранном направлении, указывая путь роботу. Другими словами, за условную единицу измерения длины пройденного расстояния выбирается усредненный размер шага взрослого мужчины $r_{ш} = 0,76$ м [18].

Учитывая то, что физический смысл вектора скорости – это расстояние, которое тело проходит в определенном направлении за единицу времени, то в сопровождающей системе под радиальным ортом предлагается понимать единичный вектор с модулем $|\vec{V}_r| = \frac{\Delta_{ш}}{\Delta t_{ш}}$

($\Delta t_{ш} = \frac{\Delta_{ш}}{1,4} = \frac{0,76}{1,4} \approx 0,55$ с) и направлением по линии визирования. Другими словами, за единицу измерения времени принимается промежуток $\Delta t_{ш}$, за который условный человек, идущий со средней скоростью, совершает один шаг протяженностью 0,76 м. При этом считается, что средняя скорость движения ведущего оператора – 1,4 м/с (5 км/ч) [18].

В модели рассматриваются только положительные значения $|\vec{V}_r| > 0$. В остальных случаях РТК должен будет остановиться. Курсовой угол φ не нормируется. Под ним понимается угол, на который в процессе движения поворачивается корпус РТК, после каждого $\Delta t_{ш}$. Положительное значение $\varphi > 0$ принимается при направлении поворота против хода часовой стрелки.

Построение маршрута осуществляется с запозданием, после того как ведущий оператор условно сделал один шаг в направлении от робота. Схема, поясняющая взаимодействие РТК и оператора в начале и в процессе движения представлена на рис. 3.

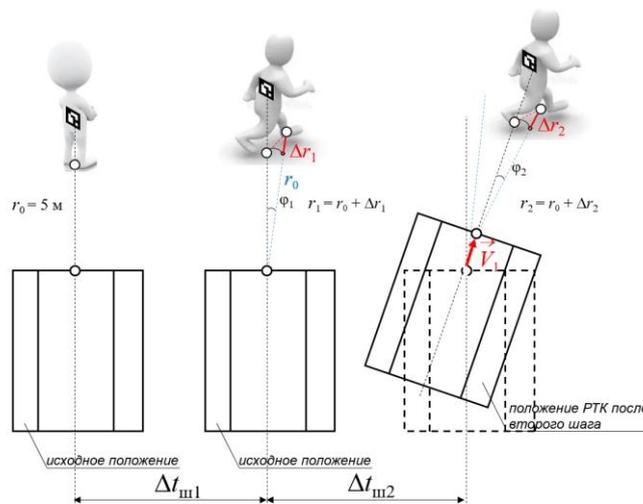


Рис. 3. Схема, поясняющая кинематику взаимодействия РТК и оператора, начинающего движение в сопровождающей системе координат

После распознавания AgUco-маркера формируются исходные данные в форме численных значений расстояния до ведущего оператора $r(t_i)$ и величины курсового угла $\varphi(t_i)$ (2). Затем оценивается удаление РТК в радиальном направлении в сравнении с его предыдущим положением

$$\Delta r(t_i) = r(t_i) - r(t_{i-1}). \quad (3)$$

Целевая функция для автономной системы управления РТК вербально выражается следующим образом. Необходимо сформировать для РТК такую команду, чтобы платформа самостоятельно переместилась в нужном направлении и на расстояние, максимально компенсирующее рассогласование (3). При этом, желательно добиться по возможности выполнения условия синхронности движения оператора и комплекса.

Другими словами, технология «Следуй за мной» должна обеспечить повторение комплексом всех изменений параметров движения (направления и скорости), которые демонстрируются оператором. По этой причине, создавая систему нечеткого управления [19], требуется подготовить для нее исходные данные (1) с использованием модели кинематического взаимодействия оператора и РТК. Алгоритм определения полярных координат ведущего, проводя селекцию видеопотока с камеры, выделяет два информативных сигнала: о расстоянии до оператора $r(t_i)$ и курсовом угле комплекса $\varphi(t_i)$. На основе интерпретации этой информации формируются входные воздействия для нечеткого регулятора.

Прежде всего, оценивается с точки зрения нечеткой логики кинематическая зависимость требуемого вектора перемещения комплекса от параметров движения оператора. Взаимодействие оператора и РТК в процессе следования по маршруту поясняется схемой на рис. 4.

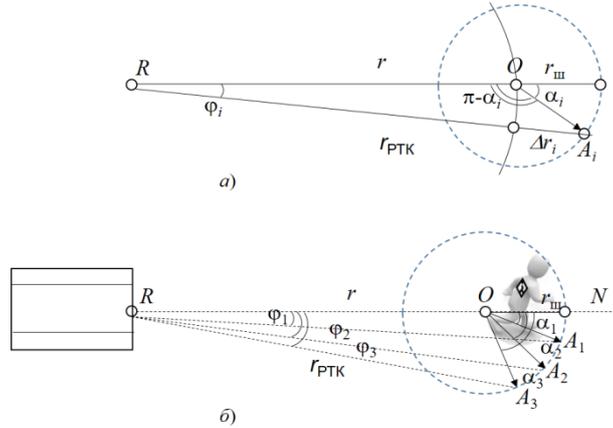


Рис. 4. Схема, поясняющая взаимодействие оператора и РТК

Значение курсового угла оператора α_i по теореме синусов определяет величину курсового угла РТК ϕ_i (рис. 4,а):

$$\phi_i = \arcsin \frac{\sin(\pi - \alpha_i) r_{\text{ш}}}{r_{\text{РТК}}}, \quad (4)$$

а увеличение дистанции между ведущим и комплексом определяется как:

$$r_{\text{РТК}} = r + \Delta r. \quad (5)$$

Введение нечеткости в процесс управления подразумевает оценивание воздействий и реакций совокупностью термов, которые сопоставляются с некоторой степенью уверенности с определенными интервалам каких-либо физических величин. Если оценивать величину курсового угла оператора, то в этом случае наиболее приемлемым видится система измерения, принятая на флоте (в румбах). Другими словами, угол изменения движения оператора предлагается сравнивать по категориям, перечисленным в табл. 2.

Таблица 2

Оценка влияния угла изменения направления движения оператора α на величину курсового угла работа ϕ

Курсовой угол оператора		ϕ , град	$tg\phi$	r , м	Δr , м
румбы	град				
2	22,5	2,92	0,051	5,71	0,71
4	45	5,543	0,097	5,563	0,563
6	67,5	7,56	0,133	5,337	0,337

Количественная оценка зависимости (табл. 2) позволяет охарактеризовать степень изменения направления движения (поворот) ведущего как «плавный», «средний» и «крутой», соответствующие численным значениям: 2, 4 и 6 румбам.

С учетом принятия допущения о дискретизации передвижения оператора вторым входным воздействием для нечеткого регулятора назначается его скорость, которая определяется как отношение протяженности его шага к принятой единице измерения времени $\Delta t_{\text{ш}}.$ Тогда применяя понятия нечеткой логики, при оценивании скорости оператора принимается градация: «полшага», «шаг» и «полтора шага».

Таким образом, система управления РТК для реализации процедуры нечеткого логического вывода в качестве управляющей информации использует две физические величины:

- ♦ отклонение направления движения оператора $\alpha(\Delta t_{\text{ши}})$, которое пересчитывается в соответствующее изменение курсового угла комплекса $\varphi(\Delta t_{\text{ши}})$;
- ♦ длина шага ведущего оператора $\Delta r(\Delta t_{\text{ши}})$.

В качестве выходного сигнала предлагается рассмотреть изменение модуля вектора перемещения робота.

Организация процедуры нечеткого логического вывода. В первую очередь выполняется формализация термов входных и выходных сигналов путем их описания функциями принадлежности на основе знаний «эксперта» для определения функций принадлежности термов всех используемых лингвистических переменных [20]. С учетом рекомендаций [21] применяется прямой метод построения функции принадлежности. Для описания изменения степеней изменения направлений движения оператора использовались численные значения этой характеристики (табл. 2). Дополнением к интерпретации результатов оценивания измеряемых величин послужило формирование полярной шкалы. Эта процедура уже производится на основе интуитивной субъективности эксперта, которая предполагает наличие способности понимать сущность самого процесса кинематического взаимодействия. Прежде всего, это умение конкретного индивида должно основываться на знаниях и внутреннем опыте человека, занимающегося теоретическим описанием функции принадлежности.

В рассматриваемом примере каждый использующийся для моделирования терм формализуется типовой унимодальной треугольной функцией принадлежности, определяемой последовательной тройкой чисел (a, b, c) . Ее значения в точке x вычисляются согласно выражению [23–25].

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & \text{во всех остальных случаях} \end{cases} \quad (4)$$

Функции принадлежности $\mu(x_{A_i})$ для каждого применяемого терма A_i объединяются для формирования функции принадлежности всей лингвистической переменной $\mu_B(x)$ с использованием принципа обобщения Заде [25]:

$$\mu_B(x) = \begin{cases} \sup_{f(x_1, \dots, x_n)=y} \min_{x_1, \dots, x_n} \{ \mu_{A_1}(x_1); \dots; \mu_{A_n}(x_n), \text{ если } y \in f(x) \} \\ 0, \text{ если } y \notin f(x) \end{cases} \quad (5)$$

Пример графика обобщенной функции принадлежности лингвистической переменной «изменение курсового угла РТК» для термов: «плавный» $\mu_{A1}(x)$, «средний» $\mu_{A2}(x)$ и «крутой» $\mu_{A3}(x)$, поясняются схемой (рис. 5).

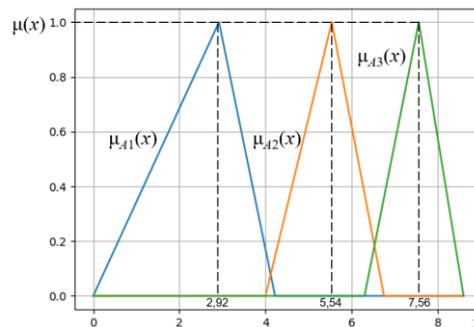


Рис. 5. График функций принадлежности лингвистической переменной, характеризующей изменение курсового угла РТК

В соответствии с (4,5) формализуются все входные и выходные сигналы и осуществляется переход к созданию базы правил, которая должна связывать лингвистические переменные. Она является основной компонентой, которая во многом определяет качество управления.

Вторым этапом является разработка базы нечетких правил, связывающих лингвистические переменные [25]. Продукционное правило состоит из предпосылки (часть «ЕСЛИ ...») и заключения (часть «ТО...»). Предпосылка содержит более одного факта, которые в рассматриваемом случае объединяются логическим «И». Для алгоритма построения маршрута правила имеют следующий вид. «ЕСЛИ оператор сделал ПЛАВНЫЙ поворот И сместился в нужном направлении на ПОЛШАГА, ТО комплекс должен переместиться на КОРОТКОЕ расстояние». Особое внимание обращается на условия, которые должны быть выполнены при построении базы. Правила не должны содержать противоречий. Система правил должна быть полной и представлять собой перечень паросочетаний из термов лингвистических переменных (табл. 3).

Таблица 3

База правил для нечеткого логического вывода

№ правила	Функции принадлежности входные переменные		Модуль вектора скорости РТК (расстояние перемещения) $\mu_C(y)$
	курсовой угол оператора $\mu_A(x_i)$	модуль вектора скорости оператора $\mu_B(y_i)$	
1.	плавный	полшага	короткое
2.	плавный	шаг	короткое
3.	плавный	полтора шага	среднее
4.	средний	полшага	короткое
5.	средний	шаг	среднее
6.	средний	полтора шага	среднее
7.	крутой	полшага	среднее
8.	крутой	шаг	длинное
9.	крутой	полтора шага	длинное

Каждому паросочетанию термов входных, лингвистических переменных ставится в соответствие заключение о терме выходной величины на основе экспертного суждения. Непротиворечивость системы правил означает, что в ней не должны присутствовать правила, в которых нечетким высказываниям в условной части соответствуют взаимоисключающие нечеткие выводы [22].

В процессе агрегирования [19, 25] определяется степень истинности условий по каждому из правил системы нечеткого логического вывода. В рассматриваемом случае, когда условие состоит из нескольких подусловий вида: «ЕСЛИ значение угла поворота оператора x_i соответствует терму «ПЛАВНЫЙ» со значением функции принадлежности $\mu_A(x_i)$ И значение удаления оператора y_i расценивается как «ПОЛШАГА» со значением $\mu_B(y_i)$, ТО определяется степень истинности сложного высказывания о модуле скорости перемещения РТК на основе известных значений истинности подусловий». Используется нечеткая импликация:

$$\mu_R(x, y) = I(\mu_A(x), \mu_B(y)),$$

$$I_M(x, y) = \min\{x, y\}.$$

Другими словами, необходимо определить функцию принадлежности результата нечеткого вывода, которую найти по формуле [24]

$$\mu_C(y) = \sup T(\mu_C(y), \mu_R(x, y)), \tag{6}$$

где I_M - обозначается операция нечеткой импликации; $T(\mu_C(y), \mu_R(x, y))$ – t -норма.

Реализуя нечеткую импликацию по Мамдани, можно упростить формулу (6) до выражения для выполнения нечеткой конъюнкции [24]:

$$\mu_R(x,y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}.$$

Предпоследним шагом в цепочке логического вывода является аккумуляция – процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Ее цель – объединить все степени истинности заключений для функций принадлежности выходной переменной.

Завершает процедуру дефаззификация (приведение к четкости), которая необходима для нахождения обычного значения выходной лингвистической переменной. Для выполнения численных расчетов предлагается применить метод центра тяжести, который считается одним из самых простых, и одновременно обеспечивает необходимую точность расчетов [20]. Оценка производится по формуле:

$$CoG(\mu_c(y)) = \frac{\int_{y_{min}}^{y_{max}} y \mu_{РТК}(y) dy}{\int_{y_{min}}^{y_{max}} \mu_{РТК}(y) dy},$$

где $CoG(\mu_c(y))$ – центр тяжести (*Centre of Gravity*) геометрической фигуры, полученной в процессе аккумуляции путем объединения всех степеней истинности заключений для функций принадлежности выходной переменной (в рассматриваемом случае модуля вектора скорости РТК).

Предлагаемый алгоритм реализован в программной среде *Python* с использованием библиотеки встроенных функций для работы с аппаратом нечеткой логики *Skfuzzy*. Для оценивания точности реализации целевой функции проведено имитационное моделирование, в ходе которого задается траектория движения ведущего оператора (рис. 6).

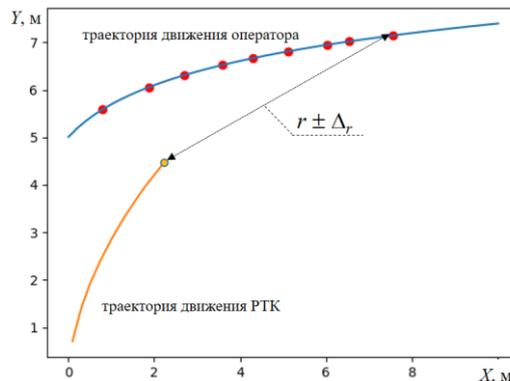


Рис. 6. Пример траекторий движения ведущего оператора и РТК по результатам имитационного моделирования движения оператора РТК

Алгоритм на основе исходных данных (1) и с использованием аппарата нечеткого логического вывода рассчитывает модуль и направление вектора движения комплекса $\vec{V}_{РТК}$. Сравнение траекторий ведущего и комплекса, поясняющие результаты моделирования, показывает полное соответствие методу погони. Выполнение требований целевой функции (2) обеспечивается в допустимых пределах. Для рассматриваемого примера после тысячи реализаций среднее отклонение от установленной дистанции составило $\Delta_r^* \approx 0,2047$ м. При удалении движущейся платформы в 5 м такую ошибку можно считать вполне приемлемой.

Заключение. Применение вместо обычного следящего ПИД-регулятора алгоритма построения маршрута с применением аппарата нечеткой логики уже само по себе считается применением технологий ИИ. Его достоинством является то, что он позволяет обрабатывать неопределенные исходные данные. Это подчеркивает его гибкость и способность

адаптироваться к различным ситуациям. Нечеткая логика основана на лингвистических переменных, которые легко понять и интерпретировать. Применение нечеткого логического вывода в системе управления автономного РТК делает процедуру его совершенствования более доступной для пользователей без специальных знаний. Использование математического аппарата нечеткой логики предоставляет возможность для более точного моделирования реальной ситуации, в которой входные данные могут быть неоднозначными. При этом нечеткий вывод обеспечивает достижение оптимального результата.

В условиях неопределенности и нестационарности свойств объекта регулирования использование нечетких систем предпочтительнее по сравнению с типовыми системами регулирования. Результаты сравнительного анализа нечеткого и классического ПИД регуляторов свидетельствуют, что нечеткий регулятор обеспечивает устойчивое слежение с ошибками на порядок меньше [26].

Основные преимущества применения нечеткой логики для решения задач автоматизации по сравнению с традиционными подходами теории автоматического управления состоят в следующем:

- ◆ значительное повышение быстродействия процессов управления;
- ◆ возможность создания систем управления для объектов, алгоритмы функционирования которых трудно формализуемы методами традиционной математики и включения в процесс управления дополнительных алгоритмов, повышающих устойчивость к помехам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоглазов Д.А., Косенко Е.Ю., Коберси И.С., Соловьев В.В., Шаповалов И.О. Интеллектуальное управление движением автономных подвижных объектов на основе поведенческого подхода // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3077.
2. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. Оценивание и управление в сложных динамических системах. – М.: Физматлит, 2009. – 295 с.
3. Юценко А.С. Управление роботами с использованием нечеткой логики: состояние и проблемы // Новости искусственного интеллекта. – 2006. – № 1. – С. 119-130.
4. Saffiotti A. The uses of fuzzy logic for autonomous robot navigation: a catalogue raisonn'e // Soft Computing Research journal. – 1997. – Vol. 1, No. 4. – P. 180-197.
5. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с.
6. Amur S. Al Yahmedi and Muhammed A. Fatmi. Fuzzy Logic Based Navigation of Mobile Robots. – Oman: Sultan Qaboos University, 2012.
7. Tang Sai Hong, Danial Nakhaeimia and Babak Karasfi. Application of Fuzzy Logic in Mobile Robot Navigation. – Malaysia: University Putra, 2013.
8. Kobersy Iskandar S., Ignatev V.V., Beloglazov D.A., Kramarenko E.R. An intelligent navigator with the control of the car technical condition // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2014. – No. 9. – P. 1094-1098.
9. Белоглазов Д.А., Косенко Е.Ю., Соловьев В.В., Тутов А.Е., Шаповалов И.О. Разработка метода планирования траектории перемещения мобильного автономного робота в трехмерной среде на основе аппарата нечеткой логики // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. – URL: <https://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3387>.
10. Kobersy I., Finaev V., Beloglazov D., Shapovalov I., Zargaryan J., Soloviev V. Design features and research on the neuro-like learning control system of a vehicle // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2014. – No. 1. – P. 73-80.
11. Hamdan N., Medvedev M., Pshikhopov V. Method of Motion Path Planning Based on a Deep Neural Network with Vector Input // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2024. – Vol. 25 (11). – P. 559-567.
12. ГОСТ Р 59276-2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021. – 16 с.
13. ArUco-маркер. – URL: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html.
14. Технологии и системы искусственного интеллекта военного назначения. Общие положения. Термины и определения. Классификация. Методические материалы. – М.: 46 ЦНИИ МО, 2022. – 18 с.
15. ГОСТ Р 59277-2020 Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. – М.: Стандартинформ, 2021. – 12 с.

16. Толстиков А.Н., Толстиков Н.Г. Сравнение алгоритмов преследования объектов. – URL: <https://www.cyberleninka.ru/article/n/sravnienie-algoritmov-presledovaniya-obektov/viewer>.
17. Сопровождающая система координат (естественный трехгранник). – URL: <https://www.studfile.net/preview/1702159/page:3/>.
18. Какая длина шага при росте 170 см? – URL: <https://www.quepaw.com.ru/smart-home/kakay-dlina-saga-pri-roste-170-sm>.
19. Системы нечеткого логического вывода. – URL: <https://www.infopedia.su/3x494a.html>.
20. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.
21. Павлов А.Н., Соколов Б.В. Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие. – СПб., 2016. – 72 с.
22. Чернов В.Г. Нечеткие множества. Основы теории и применения: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. – 156 с.
23. Григорьева Д.Р., Гареева Г.А., Басыров Р.Р. Основы нечеткой логики: учеб.-метод. пособие к практическим занятиям и лабораторным работам. – Набережные Челны: Изд-во НЧИ КФУ, 2018. – 42 с.
24. Броневиц А.Г., Ленский А.Е. Нечеткие модели анализа данных и принятия решений: учеб. пособие / Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. – 264 с.
25. Kosenko E., Beloglazov D., Finaev V. Vehicles Fuzzy Control Under the Conditions of Uncertainty // (глава в монографии) Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments, pp. 97. – Oxford, United Kindow: Elsevier (Butterworth-Heinemann), 2017. – 300 p.
26. Копылов В.И., Муравьев Д.И., Коломыцев В.Г., Рустамханова Г.И. Исследование классических и нечетких ПИД-регуляторов для нестационарных объектов управления // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-3. – С. 532-536.
27. Назаров Е.А., Зябра А.В., Зайцева А.В. Функционально-когнитивный подход к испытаниям технологий искусственного интеллекта в наземных робототехнических комплексах // Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА». – 2023. – Т. 4, № 1. – С. 76-82.

REFERENCES

1. Beloglazov D.A., Kosenko E.Yu., Kobersi I.S., Solov'ev V.V., Shapovalov I.O. Intellektual'noe upravlenie dvizheniem avtonomnykh podvizhnykh ob"ektov na osnove povedencheskogo podkhoda [Intelligent control of the motion of autonomous mobile objects based on the behavioral approach], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2015, No. 3. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3077.
2. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Otsenivanie i upravlenie v slozhnykh dinamicheskikh sistemakh [Estimation and control in complex dynamic systems]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 295 p.
3. Yushchenko A.S. Upravlenie robotami s ispol'zovaniem nechetkoy logiki: sostoyanie i problemy [Robot control using fuzzy logic: status and problems], *Novosti iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence News], 2006, No. 1, pp. 119-130.
4. Saffiotti A. The uses of fuzzy logic for autonomous robot navigation: a catalogue raisonn'e, *Soft Computing Research journal*, 1997, Vol. 1, No. 4, pp. 180-197.
5. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Control of moving objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011, 350 p.
6. Amur S. Al Yahmedi and Muhammed A. Fatmi. Fuzzy Logic Based Navigation of Mobile Robots. Oman: Sultan Qaboos University, 2012.
7. Tang Sai Hong, Danial Nakhaeinia and Babak Karasfi. Application of Fuzzy Logic in Mobile Robot Navigation. Malaysia: University Putra, 2013.
8. Kobersy Iskandar S., Ignatev V.V., Beloglazov D.A., Kramarenko E.R. An intelligent navigator with the control of the car technical condition, *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, No. 9, pp. 1094-1098.
9. Beloglazov D.A., Kosenko E.Yu., Solov'ev V.V., Titov A.E., Shapovalov I.O. Razrabotka metoda planirovaniya traektorii peremeshcheniya mobil'nogo avtonomnogo robota v trekhmernoy srede na osnove apparata nechetkoy logiki [Development of a method for planning the trajectory of a mobile autonomous robot in a three-dimensional environment based on the fuzzy logic apparatus], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2015, No. 4. Available at: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3387>.

10. Kobersy I., Finaev V., Beloglazov D., Shapovalov I., Zargaryan J., Soloviev V. Design features and research on the neuro-like learning control system of a vehicle, *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, No. 1, pp. 73-80.
11. Hamdan N., Medvedev M., Pshikhov V. Method of Motion Path Planning Based on a Deep Neural Network with Vector Input, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2024, Vol. 25 (11), pp. 559-567.
12. GOST R 59276-2020. Sistemy iskusstvennogo intellekta. Sposoby obespecheniya doveriya. Obshchie polozheniya [GOST R 59276-2020. Artificial intelligence systems. Methods of ensuring trust. General provisions]. Moscow: Standartinform, 2021, 16 p.
13. ArUco-мапкер. Available at: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html.
14. Tekhnologii i sistemy iskusstvennogo intellekta voennogo naznacheniya. Obshchie polozheniya. Terminy i opredeleniya. Klassifikatsiya. Metodicheskie materialy [Artificial intelligence technologies and systems for military purposes. General provisions. Terms and definitions. Classification. Methodological materials]. Moscow: 46 TSNII MO, 2022, 18 p.
15. GOST R 59277-2020 Sistemy iskusstvennogo intellekta. Klassifikatsiya sistem iskusstvennogo intellekta [GOST R 59277-2020 Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems]. Moscow: Standartinform, 2021, 12 p.
16. Tolstikov A.N., Tolstikov N.G. Sravnenie algoritmov presledovaniya ob"ektov [Comparison of object pursuit algorithms]. Available at: <https://www.cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-algoritmov-presledovaniya-obektov/viewer>.
17. Soprovozhdayushchaya sistema koordinat (estestvennyy trekhgrannik) [Accompanying coordinate system (natural trihedron)]. Available at: <https://www.studfile.net/preview/1702159/page:3/>.
18. Kakaya dlina shaga pri roste 170 sm? [What is the step length for a person 170 cm tall?]. Available at: <https://www.quepaw.com.ru/smart-home/kakay-dlina-saga-pri-roste-170-sm>.
19. Sistemy nechetkogo logicheskogo vyvoda [Fuzzy logical inference systems]. Available at: <https://www.infopedia.su/3x494a.html>.
20. Demidova G.L., Lukichev D.V. Regulyatory na osnove nechetkoy logiki v sistemakh upravleniya tekhnicheskimi ob"ektami [Fuzzy logic controllers in control systems of technical objects]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2017, 81 p.
21. Pavlov A.N., Sokolov B.V. Prinyatie resheniy v usloviyakh nechetkoy informatsii: ucheb. posobie [Decision making in conditions of fuzzy information: textbook]. Saint Petersburg, 2016, 72 p.
22. Chernov V.G. Nечеткие множества. Основы теории и применения: учеб. пособие [Fuzzy sets. Fundamentals of theory and application: a tutorial]. Vladimir: Izd-vo VIGU, 2018, 156 p.
23. Grigor'eva D.R., Gareeva G.A., Basyrov R.R. Основы нечеткой логики: учеб.-метод. пособие к практическим занятиям и лабораторным работам [Fundamentals of fuzzy logic: a teaching aid for practical classes and laboratory work]. Naberezhnye Chelny: Izd-vo NCHI KFU, 2018, 42 p.
24. Bronevich A.G., Lepskiy A.E. Nечеткие модели анализа данных и принятия решений: учеб. пособие [Fuzzy models of data analysis and decision making: a tutorial]. Nats. issled. un-t «Vysshaya shkola ekonomiki». Moscow: Izd. dom Vysshey shkoly ekonomiki, 2022, 264 p.
25. Kosenko E., Beloglazov D., Finaev V. Vehicles Fuzzy Control Under the Conditions of Uncertainty, (chapter in a monograph) *Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments*, pp. 97. Oxford, United Kindow: Elsevier (Butterworth-Heinemann), 2017, 300 p.
26. Kopylov V.I., Murav'ev D.I., Kolomytsev V.G., Rustamkhanova G.I. Issledovanie klassicheskikh i nechetkikh PID-regulyatorov dlya nestatsionarnykh ob"ektov upravleniya [Study of classical and fuzzy PID controllers for non-stationary control objects], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2016, No. 11-3, pp. 532-536.
27. Nazarov E.A., Zayara A.V., Zaytseva A.V. Funktsional'no-kognitivnyy podkhod k ispytaniyam tekhnologiy iskusstvennogo intellekta v nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksakh [Functional-cognitive approach to testing artificial intelligence technologies in ground-based robotic complexes], *Vestnik Voennogo innovatsionnogo tekhnopolisa «ERA»* [Bulletin of the Military Innovation Technopolis "ERA"], 2023, Vol. 4, No. 1, pp. 76-82.

Назаров Евгений Анатольевич - Михайловская военная артиллерийская академия; e-mail: egnazarov@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79964061823; к.т.н.; докторант.

Данилин Максим Евгеньевич - АО «НПО «Аванти»; e-mail: info@avgr.tech; тел.: +78001004194; г. Казань, Россия; генеральный директор.

Косенко Евгений Юрьевич - НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79045071963; к.т.н.; с.н.с.

Nazarov Evgeny Anatolyevich - Mikhailovskaya Military Artillery Academy; e-mail: era-nazarov@yandex.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79964061823; cand. of eng. sc.; doctoral researcher.

Danilin Maxim Evgenievich - JSC NPO Avanti; e-mail: info@avgr.tech; phone: +78001004194; Kazan, Russia; general director.

Kosenko Evgeny Yurievich - Research Institute of Robotics and Control Processes of the Southern Federal University; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79045071963; cand. of eng. sc.; senior research associate.

УДК 004.9+658.5

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-42-52

К.О. Обухов, И.Ю. Квятковская, А.В. Морозов**МЕТОД ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ
ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

Одним из основных условий успешного функционирования предприятия является грамотно организованный процесс производственного планирования. Автоматизировать эту деятельность позволяют системы производственного планирования класса APS/MES, основой которых являются алгоритмы построения производственных планов. В работе исследуется проблема составления расписания для предприятий дискретного типа производства, относящаяся к области задач многокритериальной оптимизации. Приведено формальное описание задачи планирования с учетом основных производственных ограничений (временные ограничения, требования к оснастке и порядку выполнения операций). Кратко рассмотрены основные методы решения задач данного класса, отмечены их основные достоинства и недостатки. Для решения поставленной задачи выбран подход на основе генерации эвристических правил, применяемых при планировании производственных операций на заданные ресурсы. На основе данного подхода предложен двухэтапный алгоритм построения производственных расписаний, включающий в себя генерацию правил диспетчеризации и их дальнейшее применение при построении расписания. За генерацию правил диспетчеризации отвечает генетический алгоритм. Подробно описана реализация его генетических операторов, а также состав хромосомы и древовидное представление входящих в хромосому правил диспетчеризации. Реализация алгоритма выполнена на языке C# 12 с использованием свободной платформы .NET 8. Построенный алгоритм показал свою эффективность по сравнению с жадным алгоритмом на небольших сгенерированных наборах данных. Дальнейшими исследованиями в этой области является оценка эффективности построенного алгоритма с более сложными генетическими операторами и структурой дерева выражений, а также снижение длительности процесса генерации эвристических правил для больших наборов данных.

Задачи планирования; дискретное производство; теория расписаний; генетические алгоритмы; многокритериальная оптимизация.

K.O. Obukhov, I.Yu. Kvyatkovskaya, A.V. Morozov**METHOD OF GENETIC PROGRAMMING FOR SOLVING THE PROBLEM
OF OPERATIONAL SCHEDULE PLANNING OF DISCRETE PRODUCTION**

One of the main conditions for the successful functioning of the enterprise is a well-organized production planning process. Production planning systems of the APS/MES class, the basis of which are algorithms for building production plans, allow automating this activity. The paper examines the problem of scheduling for enterprises of a discrete type of production, related to the field of multi-criteria optimization problems. A formal description of the planning task is given, taking into account the main production constraints (time constraints, equipment requirements and the order of operations). The main methods of solving problems of this class are briefly considered; their main advantages and disadvantages are noted. To solve this problem, an approach based on the generation of heuristic rules used in planning production operations for specified resources has been chosen. Based on this approach, a two-stage algorithm for building production schedules is proposed, which includes the generation of dispatching rules and their further application in building schedules. A genetic algorithm is responsible for generating dispatch rules. The implementation of its genetic operators is described in detail, as well as the composition of the chro-

mosome and the tree representation of the dispatch rules included in the chromosome. The algorithm is implemented in C# 12 using a free platform.NET 8. The implemented algorithm has shown its effectiveness in comparison with the greedy algorithm on small generated datasets. Further research in this area is aimed at evaluating the effectiveness of the constructed algorithm with more complex genetic operators and the structure of the expression tree, as well as reducing the duration of the process of generating heuristic rules for large data sets.

Planning tasks; discrete production; scheduling theory; genetic algorithms; multi-criteria optimization.

Введение. Эффективное производственное планирование является одним из ключевых факторов успешной деятельности предприятия. Эта деятельность требует не только наличия подготовленных кадров в сфере управления производством, но и подходящих инструментов – таких как автоматизированные системы управления производством. Необходимость в разработке и внедрении отечественных систем производственного управления и планирования является очень важной задачей, актуальность которой подчеркивается и на государственном уровне [1, 2]. Это связано в первую очередь с тем, что большинство систем управления производством на отечественном рынке до 2022 г. имели иностранное происхождение (программные продукты от Siemens, Dassault и других зарубежных вендоров, относящиеся к системам класса APS/MES) [3]. Внедрение подобных автоматизированных систем должно увеличить количество производимой продукции, повысить эффективность использования оборудования и материалов [4, 5].

Основным компонентом любой системы планирования являются её алгоритмы, позволяющие построить приближенное к оптимальному расписание по некоторым критериям (как правило, заданными разработчиками самой системы). Большинство задач планирования относятся к NP-полным задачам дискретной оптимизации. К их числу относится задача построения оперативно-календарного плана для предприятий дискретного производства. Как правило, производственный процесс подобных предприятий характеризуется сложными технологическими процессами, требующими соблюдения различных производственных ограничений. К таким ограничениям относится соблюдение последовательности выполнения операций и требований к использованию оснастки. Критериями оптимальности могут быть как уменьшение просроченных заказов, так и снижение временных издержек (время наладки оборудования или его простоя).

Разработка математико-алгоритмического комплекса для решения задач построения расписания, применимого для различных предприятий дискретного производства, позволит повысить их эффективность путем минимизации выбранных критериев оптимальности, отличающихся для конкретных производств. Разработанные алгоритмы могут быть в дальнейшем использованы в тиражной автоматизированной системе, которая может быть развернута для различных предприятий дискретного производства. Таким образом, одним из основных критериев к разработанным алгоритмам и их реализации является их универсальность и возможность их настройки путем указания различных метрик и критериев оптимальности. Для достижения поставленных целей необходимо формализовать задачу построения расписания для предприятий дискретного производства с учетом основных производственных ограничений, рассмотреть различные методы, используемые для решения задач планирования, разработать алгоритм планирования и произвести его апробацию.

1. Постановка задачи планирования дискретного производства. Систематизация и решение задач планирования рассматривается в рамках такого раздела дискретной математики, как теория расписаний [6]. Процесс планирования состоит из назначения работы (job) или конкретных операций работы некоторым исполнителям, чаще всего называемым машинами (machine) В отечественной и зарубежной литературе выделяют несколько подклассов задач теории расписаний [7], основными из которых являются:

1. Flow-Shop Scheduling (задачи конвейерного типа). В таких задачах работы представляют собой последовательность одних и тех же операций в одном и том же порядке, при этом расписание каждой машины представляет собой описание порядка выполнения операций каждой из работ. При этом каждая работа должна быть обработана на всех машинах (каждой операции задана конкретная машина).

2. Open-Shop Scheduling (открытая линия). Схожи с предыдущим классом задач, но не имеют ограничений на порядок выполнения операций каждой работы.

3. Job-Shop Scheduling (рабочий цех). Для каждой из работ указано отношение предшествования операций (в некоторых случаях это отношение может быть определено и между отдельными работами), также для каждой работы (или конкретных операций) задано множество машин, которые могут её выполнять.

Рассматриваемая задача построения расписания ближе всего относится к последнему классу – Job-Shop Scheduling Problem (JSSP), и описывается следующим образом. Задаётся набор производственных заказов (работы в терминологии JSSP) $Orders$. Каждый элемент $order_i$ представляет собой кортеж $\{s_i, d_i, process_i, prevOrd_i\}$, где s_i – дата начала заказа, d_i – дата окончания, $prevOrd_i \subset Orders$ – список предшествующих к выполнению заданий, $process_i$ – техпроцесс заказа, $process_i = \{O_{i1}, \dots, O_{ij}\}$. Каждая j -я операция i -го заказа представляется в виде кортежа $O_{ij} = \{p_{ij}, MC_{ij}, prevOp_{ij}\}$, где p_{ij} – нормативное время выполнения операции, MC_{ij} – набор альтернативных комбинаций машин (ресурсов) для ее выполнения, $MC_{ijk} \subset M$, $prevOp_{ij} \subset process_i$ – набор предшествующих к выполнению операций. В комбинацию ресурсов может входить основное оборудование (станок), требуемый персонал и оснастка (если имеются ограничения в её работе на нескольких станках).

Как и в классической постановке задачи JSSP, задаётся набор машин $M = \{m_1, m_2, \dots, m_M\}$. Каждая машина может обрабатывать только одну операцию в момент времени t . Для каждой $m \in M$ задана функция доступности $Availability(m, t) \rightarrow \begin{cases} 0, & \text{машина занята} \\ 1, & \text{машина } m \text{ доступна в момент времени } t \end{cases}$, описывающая доступность машины согласно графику доступности. Также задана функция расчёта переналадок $Adj(m, o_{prev}, o_{next}) \rightarrow \mathbb{N}_0$, возвращающая длительность переналадки (в секундах) для операции O_{next} на заданной машине m и предыдущей операции O_{prev} , $o_{prev}, o_{next} \in \bar{O}$, где $\bar{O} = process_1 \cup process_2 \cup \dots \cup process_n$. Переналадка означает время, необходимое для подготовки операции к выполнению на заданных машинах.

Описанная модель переналадок относится к переналадкам, зависящим от последовательности операций (sequence-dependent setup times) [8]. В системах производственного планирования для её описания чаще всего используют представление переналадок в виде матрицы с указанием нормативного времени наладки [9], но в некоторых случаях нормативное время неизвестно, либо оно изменяется при определённых внешних условиях.

Таким образом, решаемая задача является расширением классической задачи Job Shop Scheduling Problem с некоторыми дополнительными ограничениями, которые свойственны этапу оперативного планирования для дискретного производства – учет дополнительных ресурсов и оснастки, наладки оборудования и учет их календарной доступности. Наиболее близкий подкласс задач – DFJSS (Dynamic Flexible Job Shop Scheduling), описывающий задачи планирования с возможностью выбора машины для каждой операции, при этом время поступления работ распределено случайным образом. Для таких задач характерно наличие двух процессов принятия решения – принятие решения о выборе следующей операции к планированию из множества доступных, а также выбор подходящей машины (комбинации машин) для выбранной операции (в зарубежной литературе – sequencing / routing problems).

Как правило, критерий оптимизации описывается в виде максимизации или минимизации функции вида $f(s)$, где $s \in S$ – расписание из множества возможных расписаний S . Таким критерием может быть длительность переналадок или количество выполненных в срок заказов. Основная сложность возникает в том случае, если критериев оптимизации несколько. Это может произойти по следующим причинам:

1. Изменилась основная цель планирования.
2. Изначальную цель планирования невозможно (или очень сложно) представить в виде одного критерия.

Первый случай может произойти при определенных изменениях на производстве (например, появился новый срочный заказ на производство или нарушилась цепочка поставок, из-за чего более приоритетным становится учет сроков выпуска заказов, а не минимизация издержек). Повторный перерасчет расписания с последующим его анализом и внесением изменений может быть очень трудоемкой задачей даже при наличии средств автоматизированного планирования. При этом нужно учесть, что часть производственного задания уже может быть взята в работу.

Второй случай характерен при наличии нескольких критериев с одинаковым или различным приоритетом – например, оптимальным считается план с максимальным количеством выполненных в срок заказов и с минимумом издержек или переналадок. Эти параметры могут иметь различные единицы измерения и по-разному интерпретироваться, из-за чего их сложно «свернуть» в один. Кроме того, порядок применения критериев также выбирается ситуационно.

Стоит отметить, что большое количество систем производственного планирования имеет фиксированное количество критериев оптимизации, выбираемых пользователем. При расчете плана может использоваться только один критерий, либо уже определенная комбинация (при выборе определенного режима планирования). Добавление новых критериев при этом, как правило, требует разработки нового алгоритма планирования под конкретное производство.

Таким образом, описанная задача производственного планирования переходит в разряд задач многокритериальной оптимизации (МКО).

2. Краткий обзор различных методов, применимых для решения задач построения расписаний. Как правило, методы решения задач теории расписаний разделяются на несколько основных групп. Точные методы (полный перебор, метод ветвей и границ [10], динамическое программирование [11]) малоприменимы из-за высокой вычислительной сложности, и подходят только для очень небольшого размера задачи (до десятка машин/работ).

Более простым (и, чаще всего, приближенным к реальности) является использование жадных алгоритмов и различных правил диспетчеризации [12]. Данные правила описывают логику выбора операций или машин к планированию. В описываемой задаче производственного планирования дискретного производства, относящейся к классу DFJSSP (Dynamic Flexible Job Shop Scheduling Problem) можно выделить два правила для принятия решений:

1. Sequencing – выбор следующей операции к планированию из доступных на данный момент.
2. Routing – выбор комбинации машин, на которой будет запланирована выбранная операция.

Общая схема пооперационного планирования при таком подходе можно представить в виде блок-схемы (рис. 1).

Таким образом, процесс планирования является циклическим, на каждой из его итераций принимаются описанные выше решения. Функции $Routing(o)$ и $Sequencing(o, m)$ описывают расчёт приоритета согласно правилам диспетчеризации соответствующего вида, $o \in \bar{O}$, $m \in M$. Планирование происходит слева-направо, от дат запуска производственных заказов.

К минусам правил диспетчеризации можно отнести их слабую универсальность – правила, используемые одними предприятиями, могут не подходить для других, также они могут меняться и в рамках одного предприятия, например, в зависимости от загруженности производственными заказами.

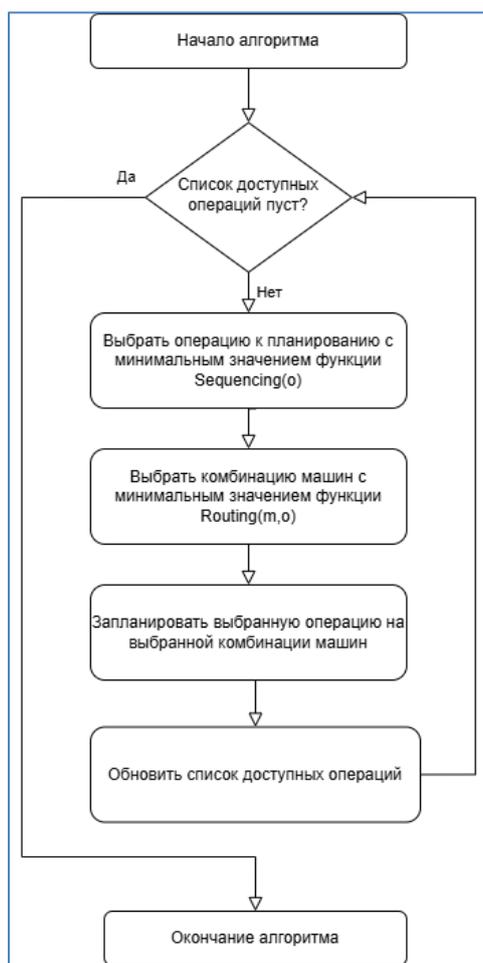


Рис. 1. Блок-схема планирования с учетом правил диспетчеризации

Метаэвристические методы (в частности, эволюционные алгоритмы) позволяют получить приближенное к оптимальному решение за относительно небольшое время [13–15]. К минусам можно отнести возможность попадания в локальный оптимум. Другая возможная проблема – сложность процедуры кодирования/декодирования решения, что особенно актуально для генетических алгоритмов. Например, при решении задач планирования при помощи генетических алгоритмов хромосому чаще всего представляют в виде последовательности операций, для каждой из которых сохраняются номера машин, которые будут её обрабатывать, и порядок обработки операции. Для получения информации по построенному расписанию (значения различных метрик) необходимо на основе этих данных построить расписание с учетом всех производственных и временных ограничений, а затем на основе полученного расписания произвести расчет метрик. Для большого набора данных этот процесс может быть достаточно трудоемким. Другой способ – модифицировать текущее расписание, не перестраивая его полностью – также может быть очень трудоемким, так как проверка корректности расписания с учетом описанных ограничений является более ресурсозатратным и сложным в реализации процессом.

Дальнейшим развитием описанных выше методов можно считать использование гиперэвристических (hyper-heuristics) методов для генерации эвристических правил. Суть подобных методов состоит в генерации некоторых эвристических правил, которые позволяют найти решение исходной задачи. Данный подход позволяет генерировать правила диспетчеризации в зависимости от текущей производственной ситуации. В контексте

сте использования генетических алгоритмов этот подход называют генетическим программированием. В отличие от описанного выше примера с представлением решения, хромосомой для такого алгоритма будет не само расписание, а правила диспетчеризации, необходимые для его генерации. Проблема генерации правил диспетчеризации широко освещалась в работах [16–18].

3. Описание алгоритма на основе генетического программирования. В рамках данной работы в качестве рассматриваемого метода был выбран метод генетического программирования. Несмотря на свою относительную новизну, данный подход показывает хорошие результаты при решении различных задач [19], в том числе задач построения расписаний. Общая схема работы алгоритма состоит из трех основных шагов – инициализации, генерации эвристики и построении расписания. Общая схема работы алгоритма представлена на рис. 2 в виде диаграммы потоков данных (DFD).



Рис. 2. Диаграмма потоков данных для разработанного алгоритма

Инициализация алгоритма включает в себя задание входных данных (списка задач и машин), а также одного или нескольких критериев оптимизации в порядке их приоритета. На основе этих данных происходит генерация эвристик планирования. Под эвристиками подразумеваются правила диспетчеризации для выбора операции (routing) и комбинации машин (sequencing). Сгенерированные эвристики сохраняются в виде дерева в отдельное хранилище с целью их дальнейшего использования при формировании расписания. Представление в виде дерева было выбрано по причине удобства его модификации и интерпретации, однако существуют и другие способы (например, представление в виде текста или низкоуровневого кода) [20]. Стоит учитывать, что данные для генерации эвристик, и данные, используемые при расчетах расписания на их основе, могут быть различными. Достоинством при этом может быть то, что более трудоемкий процесс генерации эвристик не вызывается каждый раз при каждом расчете расписания (для больших наборов данных это может быть очень трудоемкой операцией). Недостатком является то, что при сильной смене производственной ситуации (например, изменении номенклатуры выпускаемых изделий) старые эвристические правила могут стать неактуальными, и специалисту по планированию нужно будет принять решение о генерации новых эвристических правил.

Основным шагом алгоритма является этап генерации эвристик, основанные на уже упоминаемом ранее методе генетического программирования, основанным на классических генетических алгоритмах. На вход алгоритму, помимо данных о планируемых работах и машинах, передается набор критериев оптимальности, отсортированный в порядке их приоритета (важности). При декодировании каждой хромосомы происходит расчет расписания по схеме, описанной на рис. 1, после чего рассчитывается вектор чисел – значений каждого из критериев. Сравнение критериев происходит попарно, слева-направо (по аналогии с лексикографическим сравнением у строк).

Каждая хромосома представляет собой математическое выражение для каждого из правил (Routing/Sequencing). Выражение описывает функцию расчета приоритета для заданной операции/комбинации машин.

Выражения представляются в виде дерева. Нетерминальными узлами являются:

- ◆ Математические бинарные операции: +, -, *, /.
- ◆ Функции $\max(a,b)$, $\min(a,b)$.
- ◆ Значение по модулю (единственная на данный момент унарная операция).

Терминальные узлы дерева – различные метрики, рассчитываемые на основании конкретной комбинации машин или операции к выбору. Список рассматриваемых метрик приведен в табл. 1.

Таблица 1

Описание терминальных узлов деревьев выражений

Тег	Описание	Применимость в правилах	
		Routing	Sequencing
OD	Длительность рассматриваемой операции (часы)	+	+
OST	Время наладки рассматриваемой операции на рассматриваемой комбинации машин (часы)	+	-
OTD	Время, оставшееся до нормативной даты окончания при планировании рассматриваемой операции на рассматриваемой комбинации машин (routing) либо минимальное среди всех возможных комбинаций (sequencing) (часы)	+	+
JD	Длительность работы, в которую входит рассматриваемая операция (часы)	+	+
MD	Максимальное время простоя при планировании рассматриваемой операции на комбинацию машин (часы)	+	-
OCS	Расчетное время начала операции при планировании для рассматриваемой комбинации машин (часы, отступ от даты старта планирования)	+	-

Для генетического алгоритма были реализованы следующие генетические операторы:

1. Кроссовер – операция основана на обмене поддеревьями выражений (tree-swapping crossover). Для каждого из деревьев выражений выбираются случайные точки (узлы) скрещивания, дочерние узлы которых меняются местами для каждого из поддеревьев. Процедура выполняется для каждого из правил, следовательно, её результатом будут 4 отличающихся хромосомы.

2. Мутация – реализовано два вида мутаций. Первый – изменение части одного из правил на случайное поддерево. Второй – изменение случайного терминального узла на другой терминальный узел. Вторая мутация применяется в том случае, когда дерево выражения становится слишком большим (более 10 узлов).

3. Выбор родителей для скрещивания – классическая турнирная выборка (tournament selection). Этот алгоритм основан на цикле, в котором происходит случайный выбор хромосомы из популяции, и её сравнение с лучшим из выбранных ранее вариантов. Количество итераций – фиксированное число, равное 5.

Основные параметры расчета:

- ◆ Размер популяции: 1024 особи.

- ◆ Число поколений: 32.
- ◆ Число элитных хромосом: 8 (1/128 от популяции).
- ◆ Начальная популяция генерируется случайным образом, каждое эвристическое правило содержит от 1 до 3 нетерминальных узлов.
- ◆ Вероятность мутации: 0.2.

В качестве критериев оптимизации было выбрано 2 функции. Первой по приоритету является длительность производственных переналадок, второй – количество работ, не выполненных в срок.

Разработанный алгоритм реализован на языке программирования C# с использованием свободной платформы .NET 8.0. Тестовые прогоны осуществлялись на сгенерированных наборах данных небольшого размера (до 50 работ и 3 машин). Критерии оптимальности в порядке приоритета – суммарная длительность переналадок и количество незапланированных в срок работ. Описание тестовых прогонов и их сравнение с результатами работы жадного алгоритма приведено в табл. 2.

Таблица 2

Результаты тестовых запусков алгоритма

№ за-пуска	1-й критерий по приоритету (переналадки, секунды)			2-й критерий по приоритету (нарушение сроков, кол-во работ)			Длительность расчета, секунды (для генетического алгоритма)
	Жадный алгоритм	Генетическое программирование	Улучшение в %	Жадный алгоритм	Генетическое программирование	Улучшение в %	
1	79200	54000	31,82	38	29	23,68	75
2	72000	39600	45	38	29	23,68	69,36
3	79200	46800	40,91	44	30	31,82	78,55
4	90000	54000	40	42	29	30,95	73,90
5	97200	54000	44,44	40	33	17,5	65,57
6	93600	50400	46,15	41	25	39,02	73,84
7	57600	39600	31,25	35	26	25,71	43,93
8	75600	43200	42,86	43	37	13,95	76,93
9	97200	54000	44,44	41	28	31,71	86,75
10	86400	54000	37,5	37	25	32,43	70,70

При сравнении с классическими жадными алгоритмами решения на основе сгенерированных эвристик были эффективнее по переналадкам и выполненным в срок работам вплоть до 30-40% (на небольших и относительно простых наборах данных). Анализ сгенерированных правил диспетчеризации показал, что большинство «правильных» с точки зрения алгоритма правил чаще остальных используют операции \max и \min , например, следующим образом: $\max(\min(MD, JD), \max(OCS, MD)) \cdot OST$. Стоит отметить, что сгенерированные правила часто могут требовать упрощения, например, как сгенерированное выражение $OST + \min(MD, MD)$.

Выводы. В результате проделанной работы разработан и описан алгоритм оперативного планирования дискретного производства, основанный на генерации эвристических правил выбора операций и комбинаций машин посредством метода генетического программирования. Опытным путём доказана эффективность его работы по сравнению с классическими жадными алгоритмами. В частности, значения критериев оптимальности на построенных расписаниях уменьшились на 30-40% по сравнению с расписаниями, построенными жадным алгоритмом на одних и тех же наборах данных. К достоинствам алгоритма можно отнести его универсальность (можно использовать различные критерии оптимальности, а также различные узлы для описания деревьев эвристических правил). Недостатки алгоритма – высокая длительность расчёта.

Дальнейшими улучшениями алгоритма могут быть добавление новых видов узлов для описания деревьев выражений и оценка эффективности полученных на их основе решений, а также применение более продвинутых генетических операторов. Другая важная задача – построение усеченного набора данных, который бы максимально соответствовал исходному набору данных с целью уменьшения длительности расчёта эвристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности в целях достижения их «цифровой зрелости» до 2024 года и на период до 2030 года. – URL: https://www.tadviser.ru/images/8/83/Stateg_info_2021_compressed.pdf (дата обращения: 07.11.2024).
2. Корчевская А.А. [и др.]. Тренды и сценарии развития рынка систем расширенного планирования производства (APS-систем) в рамках направления «Технет» НТИ. Экспертно-аналитический доклад: монография. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 112 с.
3. Обухов К.О. Сравнительный анализ систем производственного планирования в разрезе работы с альтернативными цепочками производственных операций // Молодой ученый. – 2022. – № 20 (415). – С. 143-147. – URL: <https://moluch.ru/archive/415/91773/> (дата обращения: 07.11.2024).
4. Климова Е.З., Павлова И.А., Макушева Ю.А. Место и роль оперативно-производственного планирования в управлении предприятием // ЕГИ. – 2022. – № 42 (4). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mesto-i-rol-operativno-proizvodstvennogo-planirovaniya-v-upravlenii-predpriyatim> (дата обращения: 07.11.2024).
5. Джуха В.М., Кириллов Д.О. Потенциальные преимущества APS-систем в продажах и операционном планировании // УЭКС. – 2013. – № 7 (55). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/potentsialnye-preimuschestva-aps-sistem-v-prodazhah-i-operatsionnom-planirovanii-1> (дата обращения: 10.12.2024).
6. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. – М.: Физический факультет МГУ, 2011. – 222 с.
7. Job shop scheduling: Classification, constraints and objective functions. – URL: https://www.researchgate.net/publication/339128833_Job_shop_scheduling_Classification_constraints_and_objective_functions (дата обращения: 07.11.2024).
8. A review on job shop scheduling with setup times. – URL: https://www.researchgate.net/publication/275317984_A_review_on_job_shop_scheduling_with_setup_times (дата обращения: 10.12.2024).
9. Планирование и оптимизация процессов переналадки. – URL: <https://habr.com/ru/companies/ds/articles/533788> (дата обращения: 10.12.2024).
10. A Flexible Branch and Bound Method for the Job Shop Scheduling Problem. – URL: https://www.researchgate.net/publication/238723625_A_Flexible_Branch_and_Bound_Method_for_the_Job_Shop_Scheduling_Problem (дата обращения: 07.11.2024).
11. Dynamic Programming for Routing and Scheduling. – URL: <https://research.vu.nl/ws/portalfiles/portal/42163578/complete+dissertation.pdf> (дата обращения: 07.11.2024).
12. Designing Dispatching Rules to Minimize Total Tardiness. – URL: https://www.researchgate.net/publication/226253624_Designing_Dispatching_Rules_to_Minimize_Total_Tardiness (дата обращения: 07.11.2024).
13. A Job-Shop Scheduling Problem (JSSP) using Genetic Algorithm (GA). – URL: https://www.researchgate.net/publication/242081421_A_JOB-SHOP_SCHEDULING_PROBLEM_JSSP_USING_GENETIC_ALGORITHM_GA (дата обращения: 07.11.2024).
14. Сочнев А.Н. Планирование производства на основе управляемой генетическим алгоритмом имитационной модели // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2021. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-proizvodstva-na-osnove-upravlyaemoj-geneticheskim-algoritmom-imitatsionnoj-modeli> (дата обращения: 07.11.2024).
15. Solving the Job Shop Scheduling Problem with Ant Colony Optimization. – URL: https://www.researchgate.net/publication/363500511_Solving_the_Job_Shop_Scheduling_Problem_with_Ant_Colony_Optimization (дата обращения: 07.11.2024).
16. Zhang F., Mei Y., Nguyen S. and Zhang M. Survey on Genetic Programming and Machine Learning Techniques for Heuristic Design in Job Shop Scheduling // in IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – Feb. 2024. – Vol. 28, No. 1. – P. 147-167.
17. Dynamic flexible job shop scheduling method based on improved gene expression programming. – URL: https://www.researchgate.net/publication/343612768_Dynamic_flexible_job_shop_scheduling_method_based_on_improved_gene_expression_programming (дата обращения: 10.12.2024).

18. Zhang F., Mei Y., Nguyen S. and Zhang M. Evolving Scheduling Heuristics via Genetic Programming With Feature Selection in Dynamic Flexible Job-Shop Scheduling // in IEEE Transactions on Cybernetics. – April 2021. – Vol. 51, No. 4. – P. 1797-1811,
19. Genetic Programming: An Introduction and Tutorial. – URL: https://wiki.eecs.yorku.ca/course_archive/2010-11/W/4403/_media/gp1.pdf (дата обращения: 07.11.2024).
20. Поликарпова Н.И., Точилин В.Н. Применение генетического программирования для реализации систем со сложным поведением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2007. – № 39. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-geneticheskogo-programmirovaniya-dlya-realizatsii-sistem-so-slozhnym-povedeniem> (дата обращения: 07.11.2024).

REFERENCES

1. Strategiya tsifrovoy transformatsii obrabatyvayushchikh otrasley promyshlennosti v tselyakh dostizheniya ikh «tsifrovoy zrelosti» do 2024 goda i na period do 2030 goda [Strategy for digital transformation of manufacturing industries in order to achieve their “digital maturity” by 2024 and for the period up to 2030]. Available at: https://www.tadviser.ru/images/8/83/Stateg_info_2021_compressed.pdf (accessed 07 November 2024).
2. Korchevskaya A.A. [i dr.]. Trendy i stsenarii razvitiya rynka sistem rasshirenogo planirovaniya proizvodstva (APS-sistem) v ramkakh napravleniya «Tekhnet» NTI. Ekspertno-analiticheskiy dok-lad: monografiya [Trends and scenarios for the development of the market of advanced production planning systems (APS systems) within the framework of the Technet direction of the NTI. Expert and analytical report: monograph]. Saint Petersburg: POLITEKH-PRESS, 2024, 112 p.
3. Obukhov K.O. Sravnitel'nyy analiz sistem proizvodstvennogo planirovaniya v razreze raboty s al'ternativnymi tsepkami proizvodstvennykh operatsiy [Comparative analysis of production planning systems in the context of working with alternative chains of production operations], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2022, No. 20 (415), pp. 143-147. Available at: <https://moluch.ru/archive/415/91773/> (accessed 07 November 2024).
4. Klimova E.Z., Pavlova I.A., Makusheva Yu.A. Mesto i rol' operativno-proizvodstvennogo planirovaniya v upravlenii predpriyatiem [Place and role of operational production planning in enterprise management], *EGI* [EGI], 2022, No. 42 (4). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/mesto-i-rol-operativno-proizvodstvennogo-planirovaniya-v-upravlenii-predpriyatiem> (accessed 07 November 2024).
5. Dzhukha V.M., Kirillov D.O. Potentsial'nye preimushchestva APS-sistem v prodazhakh i operatsionnom planirovanii [Potential advantages of APS systems in sales and operational planning], *UEkS* [Management of economic systems], 2013, No. 7 (55). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/potentsialnye-preimushchestva-aps-sistem-v-prodazhah-i-operatsionnom-planirovanii-1> (accessed 10 December 2024).
6. Lazarev A.A., Gafarov E.R. Teoriya raspisaniy. Zadachi i algoritmy [Scheduling theory. Problems and algorithms]. Moscow: Fizicheskii fakul'tet MGU, 2011, 222 p.
7. Job shop scheduling: Classification, constraints and objective functions. Available at: https://www.researchgate.net/publication/339128833_Job_shop_scheduling_Classification_constraints_and_objective_functions (accessed 07 November 2024).
8. A review on job shop scheduling with setup times. Available at: https://www.researchgate.net/publication/275317984_A_review_on_job_shop_scheduling_with_setup_times (accessed 10 December 2024).
9. Planirovanie i optimizatsiya protsessov perenaladki [Planning and optimization of changeover processes]. Available at: <https://habr.com/ru/companies/ds/articles/533788> (accessed 10 December 2024).
10. A Flexible Branch and Bound Method for the Job Shop Scheduling Problem. Available at: https://www.researchgate.net/publication/238723625_A_Flexible_Branch_and_Bound_Method_for_the_Job_Shop_Scheduling_Problem (accessed 07 November 2024).
11. Dynamic Programming for Routing and Scheduling. Available at: <https://research.vu.nl/ws/portalfiles/portal/42163578/complete+dissertation.pdf> (accessed 07 November 2024).
12. Designing Dispatching Rules to Minimize Total Tardiness. Available at: https://www.researchgate.net/publication/226253624_Designing_Dispatching_Rules_to_Minimize_Total_Tardiness (accessed 07 November 2024).
13. A Job-Shop Scheduling Problem (JSSP) using Genetic Algorithm (GA). Available at: https://www.researchgate.net/publication/242081421_A_JOB-SHOP_SCHEDULING_PROBLEM_JSSP_USING_GENETIC_ALGORITHM_GA (accessed 07 November 2024).
14. Sochnev A.N. Planirovanie proizvodstva na osnove upravlyaemoy geneticheskim algoritmom imitatsionnoy modeli [Production planning based on a simulation model controlled by a genetic algorithm], *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of SFU. Engineering and Technology], 2021, No. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-proizvodstva-na-osnove-upravlyaemoy-geneticheskim-algoritmom-imitatsionnoy-modeli> (accessed 07 November 2024).

15. Solving the Job Shop Scheduling Problem with Ant Colony Optimization. Available at: https://www.researchgate.net/publication/363500511_Solving_the_Job_Shop_Scheduling_Problem_with_Ant_Colony_Optimization (accessed 07 November 2024).
16. Zhang F., Mei Y., Nguyen S. and Zhang M. Survey on Genetic Programming and Machine Learning Techniques for Heuristic Design in Job Shop Scheduling, in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Feb. 2024, Vol. 28, No. 1, pp. 147-167.
17. Dynamic flexible job shop scheduling method based on improved gene expression programming. Available at: https://www.researchgate.net/publication/343612768_Dynamic_flexible_job_shop_scheduling_method_based_on_improved_gene_expression_programming (accessed 10 December 2024).
18. Zhang F., Mei Y., Nguyen S. and Zhang M. Evolving Scheduling Heuristics via Genetic Programming With Feature Selection in Dynamic Flexible Job-Shop Scheduling, in *IEEE Transactions on Cybernetics*, April 2021, Vol. 51, No. 4, pp. 1797-1811.
19. Genetic Programming: An Introduction and Tutorial. Available at: https://wiki.eecs.yorku.ca/course_archive/2010-11/W/4403/_media/gp1.pdf (accessed 07 November 2024).
20. Polikarpova N.I., Tochilin V.N. Primenenie geneticheskogo programmirovaniya dlya realizatsii sistem so slozhnym povedeniem [Application of genetic programming for the implementation of systems with complex behavior], *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2007, No. 39. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-geneticheskogo-programmirovaniya-dlya-realizatsii-sistem-so-slozhnym-povedeniem> (accessed 07 November 2024).

Обухов Константин Олегович – Астраханский государственный технический университет; e-mail: kobukhov98@mail.ru; г. Астрахань, Россия; кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления; аспирант.

Квятковская Ирина Юрьевна – e-mail: i.kvyatkovskaya@astu.org; кафедра высшей и прикладной математики; д.т.н.; профессор.

Морозов Александр Васильевич – e-mail: morozov@ilabsltd.com; кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления; к.т.н.; доцент.

Obukhov Konstantin Olegovich – Astrakhan State Technical University; e-mail: kobukhov98@mail.ru; Astrakhan, Russia; the Department of Automated Information Processing and Control Systems; postgraduate student.

Kvyatkovskaya Irina Yurievna – e-mail: i.kvyatkovskaya@astu.org; the Department of Higher and Applied Mathematics; dr. of eng. sc.; professor.

Morozov Aleksandr Vasil'evich – e-mail: morozov@ilabsltd.com; the Department of Automated Information Processing and Control Systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.37

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-52-64

З.А. Понимаш, М.В. Потанин

МЕТОД И АЛГОРИТМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ИЗ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ТРАНСФОРМЕР

В последнее время нейросетевые модели стали одним из наиболее перспективных направлений в области автоматического извлечения признаков из цифровых сигналов. Традиционные подходы, такие как статистический, временной, частотный и частотно-временной анализ, требуют значительных экспертных знаний и часто оказываются недостаточно эффективными при работе с нестационарными и сложными сигналами, например, биомедицинскими (ЭКГ, ЭЭГ, ЭМГ) или промышленными сигналами (примером могут служить токограммы). Перечисленные выше методы имеют ряд ограничений, когда требуется анализировать многоканальные данные с изменяющейся частотной структурой, либо когда разметка сигналов слишком трудоёмка или дорогостоящая. Современные архитектуры нейросетей, такие как трансформеры, показали высокую эффективность в автоматическом извлечении признаков из сложных данных. Трансформеры превосходят традиционные свёрточные и рекуррентные нейронные сети по многим ключевым характеристикам.

кам, особенно в задачах прогнозирования временных рядов, классификации мультимодальных данных и извлечения признаков из последовательностей. Их способность моделировать сложные временные зависимости и нелинейные зависимости в данных делает их идеальными для таких задач, как фильтрация шумов и обработка мультимодальных сигналов. В данной статье предложен метод извлечения признаков из цифровых сигналов, основанный на модифицированной архитектуре трансформера, включающей нелинейный слой после модуля самовнимания. Этот подход позволил улучшить способность модели выявлять сложные и нелинейные зависимости в данных, что особенно важно при работе с биомедицинскими и полученными от промышленных систем сигналами. Приводится описание архитектуры и проведенных экспериментов, демонстрирующих высокие показатели модели при решении задач классификации, прогнозирования и фильтрации сигналов. Ожидается, что данная модель может применяться для широкого спектра приложений, включая диагностику заболеваний и сбоев, прогнозирование параметров сигналов и системное моделирование.

Нейросетевые алгоритмы; трансформеры; извлечение признаков; цифровая обработка сигналов; медицинские сигналы; мультимодальные данные; временные ряды.

Z.A. Ponimash M.V. Potanin

METHOD AND ALGORITHM FOR EXTRACTING FEATURES FROM DIGITAL SIGNALS BASED ON NEURAL NETWORKS TRANSFORMER

Recently, neural network models have become one of the most promising directions in the field of automatic feature extraction from digital signals. Traditional approaches, such as statistical, time-domain, frequency-domain, and time-frequency analysis, require significant expert knowledge and often prove insufficiently effective when dealing with non-stationary and complex signals, such as biomedical signals (ECG, EEG, EMG) or industrial signals (e.g., currentgrams). These methods have several limitations when it comes to analyzing multichannel data with varying frequency structures or when signal labeling is too labor-intensive or expensive. Modern neural network architectures, such as transformers, have demonstrated high efficiency in automatic feature extraction from complex data. Transformers have outperformed traditional convolutional and recurrent neural networks in many key metrics, particularly in tasks involving time series forecasting, multimodal data classification, and feature extraction from sequences. Their ability to model complex temporal dependencies and nonlinear relationships in data makes them ideal for tasks such as noise filtering and multimodal signal processing. This paper proposes a method for feature extraction from digital signals based on a modified transformer architecture that incorporates a nonlinear layer after the self-inspection module. This approach improved the ability of the model to detect complex and nonlinear dependencies in the data, which is particularly important when dealing with biomedical and signals obtained from industrial systems. A description of the architecture and the experiments performed are presented, demonstrating the high performance of the model in solving signal classification, prediction and filtering problems. It is expected that the model can be applied to a wide range of applications including disease and fault diagnosis, signal parameter prediction and system modelling.

Neural network algorithms; transformers; feature extraction; digital signal processing; medical signals; multimodal data; time series.

Введение. Интеллектуальная обработка данных активно применяется для анализа сигналов различной природы: биомедицинских, радиотехнических, акустических, промышленных и других. Алгоритмы обработки сигналов обычно состоят из двух модулей: извлечения признаков и принятия решений, часто реализуемого методами машинного обучения, включая нейросети [1] (рис. 1). Решающее правило может быть отдельным блоком, например, функции Хевисайда или более сложные алгоритмы семплирования, такие как top-k, ядерное сэмпирование и обучаемые алгоритмы [2–9]. Для решения задачи классификации применяются метод ближайших соседей, архитектура KAN [10], для задачи восстановления регрессии используют следующие методы, множественная регрессия, ядерный метод SVM, метод Надарая-Ватсона и др.

Задача автоматического извлечения признаков из сигналов особенно актуальна, когда мы говорим о таких сигналах, где с одной стороны очень много сырых данных, а с другой разметка достаточно дорогая. К таким сигналам можно отнести, например, биомедицинские. Такие как электрокардиограммы (ЭКГ), электроэнцефалограммы (ЭЭГ), электромиограммы (ЭМГ), а также некоторые другие сигналы различной природы, например токограммы электродвигателей, ионный ток в ДВС или же акустические сигналы. Задача из-

влечения признаков заключается в преобразовании этих сигналов в набор информативных характеристик, которые могут быть использованы для классификации, прогнозирования или иных задач анализа, чаще всего производится преобразование в вектор фиксированной длины. Современные методы извлечения признаков из сигналов включают разнообразные подходы, основанные на статистическом, временном, частотном или частотно-временном анализе, кроме того, некоторые подходы базируются на методах глубокого обучения, часто методы машинного обучения работают поверх уже извлеченных первичных признаков и извлекают более информативные вторичные признаки.



Рис. 1. Общая схема решения задачи

Современные методы автоматического извлечения признаков включают в себя статистический, временной, частотный и частотно-временной анализ, а также глубокое обучение. Статистические методы, основанные на вычислении среднего, дисперсии и автокорреляции, эффективны для стационарных сигналов, но ограничены в анализе нестационарных данных [12–14]. Частотные методы, такие как БПФ, СПМ и мел-кепстральные коэффициенты показывают высокое качество для сигналов со сложной спектральной структурой (для анализа полигармонических сигналов), но их базисные функции не локализованы во времени, что решается с помощью вейвлет-преобразования. Методы линейного предсказания и информационные метрики, такие как энтропия, также находят широкое применение [15].

Глубокое обучение предоставляет мощные инструменты для автоматического извлечения признаков. Сверточные и рекуррентные нейронные сети позволяют эффективно обрабатывать временные и пространственные данные, выявляя сложные паттерны. Архитектуры трансформеров и вариационные автокодировщики (VAE) демонстрируют высокую производительность в задачах анализа сигналов, улучшая непрерывность и компактность признакового пространства [16–26].

Нейронные сети успешно применяются для работы с биомедицинскими сигналами [16–18], радиотехническими, например, в нейросетевых алгоритмах демодуляции сигналов [19], распознавании речи и идентификации диктора [20–21], а также в задачах анализа временных рядов.

Другим перспективным направлением является применение нейросетей из семейства архитектур «трансформер» [24, 25]. Трансформеры показывают более высокую производительность и скорость обучения, по сравнению, с LSTM, в задачах обработки естественного языка. Кроме того, трансформеры нашли применение и в обработке других временных и псевдо-временных рядов, в частности, анализе цифровых сигналов, демонстрируя высокие результаты в таких задачах, как классификация и сегментация.

Настоящая работа предлагает новый метод автоматического извлечения признаков на основе трансформеров с модифицированными нелинейными слоями. Данная модификация позволяет улучшить качество выделения признаков для задач анализа сигналов и обработки мультимодальных данных, что делает его полезным для широкого спектра приложений, включая медицинские и промышленные системы.

Постановка задачи. Задача заключается в разработке метода извлечения признаков из цифровых сигналов, основанного на подходе, аналогичном тому, который используют GPT-подобные модели для генерации текста. В отличие от традиционного подхода, задача прогнозирования временного ряда должна решаться одновременно для двух временных точек, t и $t + \Delta t$, где $t, \Delta t \in \mathbb{N}$. Это позволяет учитывать временные зависимости на больших интервалах (в рамках данной работы рассматривается $t = 0, \Delta t = 1$). При этом система должна обеспечивать кодирование признаков во внутренних скрытых слоях, а также решать задачи фильтрации, прогнозирования и классификации временных рядов. Также рассматривается возможность работы с мультимодальными выходными данными, что позволяет использовать метод в различных прикладных сценариях.

Основную задачу можно разделить на ряд подзадач:

1. Составление обучающего набора данных с их пред. Обработкой.
2. Разработка алгоритма извлечения признаков на базе нейронной сети и ее обучение.
3. Тестирование алгоритма и обсуждение результатов.

Составление датасета и предварительная обработка данных. Составление датасета состоит из 2х этапов, на первом этапе подготавливались синтетические данные на основе параметрических моделей сигналов и шума, на втором реальные отфильтрованные сигналы. Параметрическую модель сигнала можно представить следующим образом, вектор F является случайным вектором частот, Φ – фаз, A – амплитуд, $a(t)$ – синтезированный сигнал без шума, параметры $k_{ш}$ и K также являются случайными, ξ – шум. На случайные векторы накладываются ограничения исходя из параметрических моделей сигналов, например сигнала ионного тока, моделей биомедицинских сигналов и пр.

$$F = [f_1, f_2, \dots, f_K], \quad (1)$$

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_K], \quad (2)$$

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_K], \quad (3)$$

$$a(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F_k + \phi_k), \quad (4)$$

$$s(t) = a(t) + \xi(t), \quad (5)$$

Для извлечения признаков данные обрабатываются следующим образом: сигнал $s(t)$ нарезается на блоки по 130 отсчетов. Далее для задачи фильтрации на выходе восстанавливается отсчет $a(t + 130 \cdot T)$, где T – период дискретизации. Для задачи прогнозирования мы восстанавливаем отсчет $s(t + 131 \cdot T)$. При решении задачи классификации для каждого блока по 130 отсчетов вычисляются фиктивные классы, полученные при помощи алгоритма кластеризации на другом признаковом пространстве. Вычисляется спектральная плотность мощности каждого блока с последующей кластеризацией алгоритмом k-means на 15 кластеров. Для вычисления СПМ используется метод Уэлча с окном Блэкмана. Данная схема изображена на рис. 2.

Описание алгоритма. Алгоритм извлечения признаков состоит из блока предобработки сигнала и нейронной сети, архитектура которой приведена на рис. 3.

На вход модифицированного блока поступает исходный сигнал, объединенный с отраженным эмбедингом позиций. Позиция предыдущего состояния является наиболее важной для прогноза, ввиду чего кодирование позиций осуществляется в обратном порядке. Кроме

того, данный подход обладает лучшей обобщающей способностью относительно прямого кодирования, позволяя модели работать с отличающейся при обучении длиной контекста. Модификация блока, изображенного на рис. 4, заключается в добавлении нелинейного слоя, что позволяет выявлять сложные нелинейные зависимости в данных. Нелинейный слой, изображенный на рис. 5, состоит из двух линейных слоев с различными функциями активации для первого слоя, включая возведение в квадрат, синус, логарифм, квадратный корень, которые улучшают способность нейронной сети к обобщению и обучению.

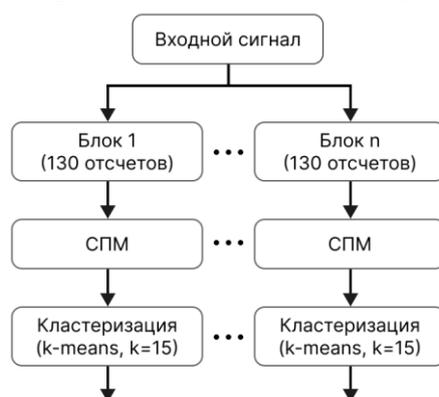


Рис. 2. Схема обработки данных

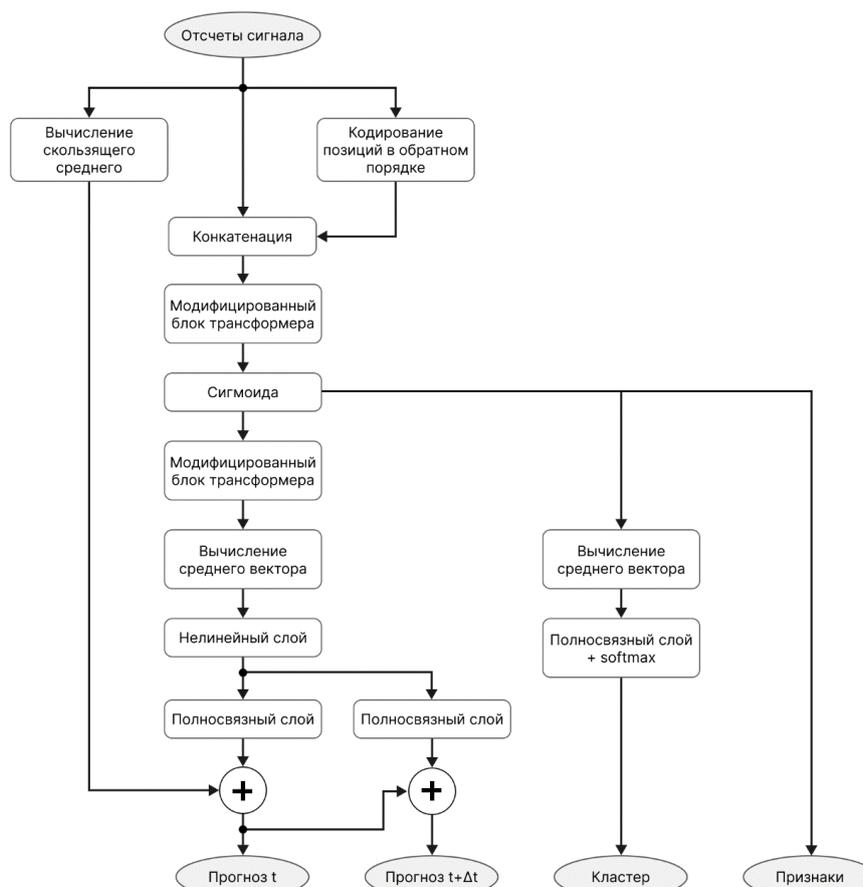


Рис. 3. Архитектура нейронной сети для извлечения признаков

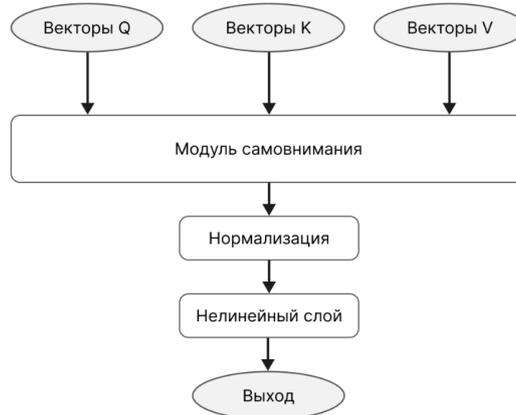


Рис. 4. Модифицированный блок трансформера

После чего, к модифицированному слою применяется сигмоидальная вектор-функция активации для извлечения признаков, участвующих в последующем решении задач прогнозирования, классификации и фильтрации.

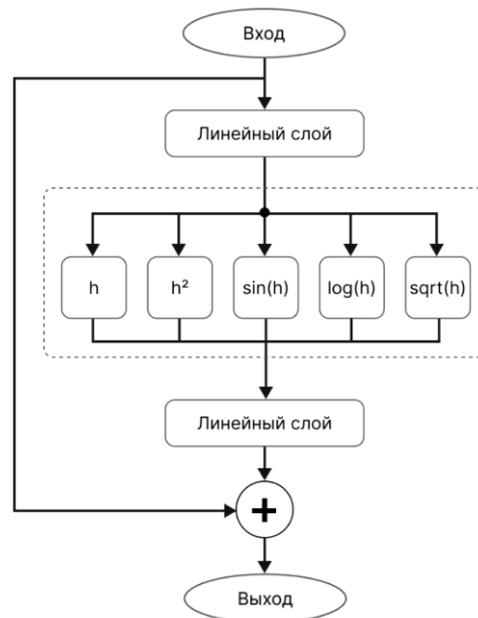


Рис. 5. Архитектура нелинейного слоя

Нелинейный слой реализует следующую функцию:

$$h = W_h \cdot x + B_h, \quad (6)$$

$$H = [h, h^2, \sin(h), \log(h), \text{sqrt}(h)]^T, \quad (7)$$

$$y = x + W_{out} \cdot H, \quad (8)$$

где x – вектор входа, h – выход скрытого слоя, W_h и B_h – матрица весовых коэффициентов и вектор смещения в скрытом слое соответственно, H – выход после расширения пространства признаков нелинейными функциями, y – выход нейронной сети, W_{out} – матрица весовых коэффициентов нелинейного слоя.

В выражении (6), вычисляется аргумент для нелинейных функций, в (7) вычисляются сами функции, а в выражении (8), то с какими весами их учитывать, данные слои можно соединять как последовательно, так и параллельно.

При необходимости кодирования в признаковом пространстве целостных мультимодальных образов, архитектуру, изображенную на рис. 3 можно масштабировать. На рис. 6 представлена алгоритм, способный обучаясь без учителя кодировать многоканальные сигналы и тексты одновременно в единый образ.

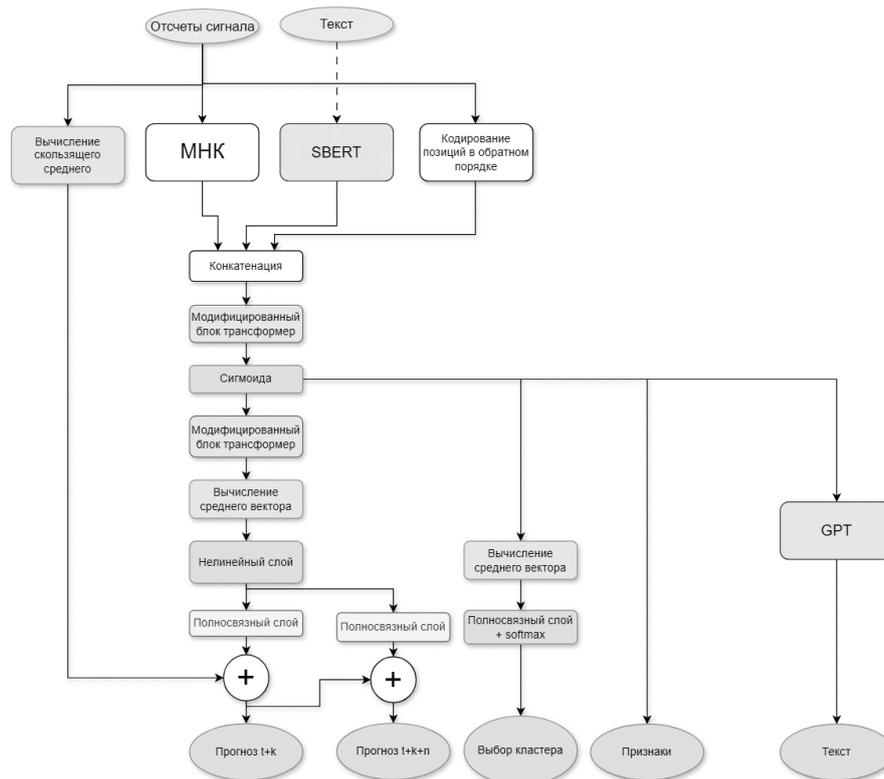


Рис. 6. Мультимодальная версия (кодирование многоканальных сигналов и текстов)

В текущей модификации возможна работа с многоканальными сигналами и текстами одновременно. На входе многоканальные сигналы обрабатываются при помощи метода независимых компонент (МНК), а текст с помощью SBERT. МНК используется для декорреляции многоканальных сигналов, этот метод также помогает уменьшить число каналов, аналогично тому, как метод главных компонент (МГК) применяют для уменьшения размерности пространства признаков. Декорреляция каналов в большинстве случаев ускоряет сходимость алгоритма обучения. SBERT используется для представления текста в виде вектора.

Выходы с МНК и SBERT конкатенируются и передаются в модифицированный блок трансформера, за которым следует слой представляющий собой сигмоидальную функцию активации. При таком подходе система кодирует признаки в скрытом слое, а выходы решают такие же задачи, как и основная архитектура (фильтрацию, прогнозирование и классификацию), кроме того, на выходе воссоздается входной текст, делается это при помощи архитектуры GPT-2, для генерации можно использовать предварительно обученную сеть GPT, например (для русского языка) `rugpt3small_based_on_gpt2`, также можно получать градиенты с выхода GPT для обучения модифицированного блока трансформера, который и производит извлечение признаков. Что позволяет обучить этот

блок кодировать и текстовую информацию, наряду с необходимыми данными для решения задач фильтрации, прогнозирования и классификации, формируя обобщенные, целостные мультимодальные образы в признаковом пространстве.

Процесс оптимизации нейронной сети включает в себя минимизацию ошибки прогнозирования, фильтрация и классификации, что приводит к формированию признаков на скрытом слое.

Изначально алгоритм извлечения признаков обучался на синтезированных данных. После предварительного обучения системы на синтетических данных, на втором этапе нейросеть может быть обучена на реальных сигналах. В таком случае полученный сигнал принимается за идеальный $a(t)$, а сигнал $s(t)$, вычисляется по формуле из выражения (5).

Обсуждение результатов. Для решения задачи регрессии, предсказания промежуточных значений сигнала, были протестированы 3 нейронные сети, двуслойная полносвязная сеть, двуслойная KAN [27] и два нелинейных слоя из данной работы. По метрике средний квадрат ошибки (MSE) (табл. 1) получены следующие результаты: 0.053 для полносвязной, 0.012 для KAN и 0.006 для данной архитектуры. Что показывает преимущество нелинейного слоя перед слоями KAN в решении вышеописанной задачи.

Ниже показаны примеры решения задач прогнозирования и фильтрации сигнала. На рис. 7 показан пример работы алгоритма на задаче фильтрации сигнала, до обучения сети, на рисунке виден сдвиг фазы и отсутствие ВЧ составляющей, основной вклад в фильтрацию вносит скользящее среднее, с АЧХ вида $K(\omega) = \left| \frac{\sin(\omega k)}{\omega k} \right|$.

Таблица 1

Сравнение моделей по метрикам качества

Метрика / Задача	Полносвязная сеть	KAN	Наша модель
MSE (регрессия)	0.053	0.012	0.006
R2 (фильтрация)	-	-	0.81
R2 (прогнозирование)	-	-	0.78
F1 (классификация)	-	-	0.91

Фильтрация сигнала представляет собой процесс удаления шума из исходного сигнала для восстановления его истинной формы. В данном случае целью было сравнение отфильтрованного сигнала с оригинальным сигналом без шума. Средняя метрика R2 для задачи фильтрации составила 0.81. Коэффициент детерминации (R2) измеряет степень соответствия предсказаний алгоритма реальным значениям. Значение 0.81 указывает на то, что 81% дисперсии в исходном сигнале без шума объясняется отфильтрованным сигналом.

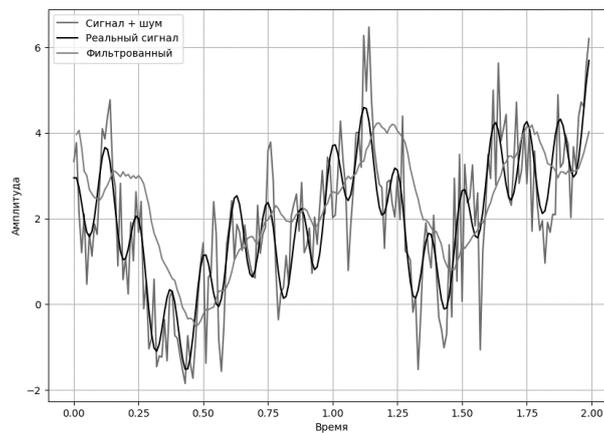


Рис. 7. Задача фильтрации сигнала, до обучения сети

После обучения нейронной сети был устранен фазовый сдвиг и добавлена ВЧ составляющая, результат представлен на рис. 8. На рис. 9, показан сигнал с шумом до фильтрации, на рис. 10 – после.

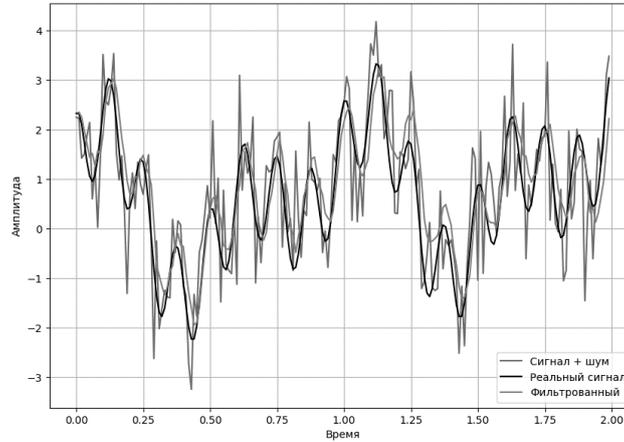


Рис. 8. Задача фильтрации сигнала, после обучения сети

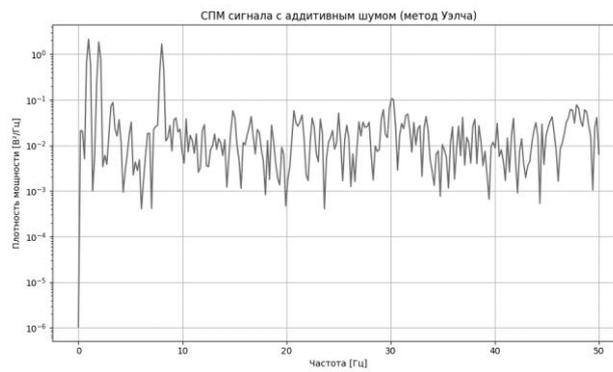


Рис. 9. Спектральная плотность мощности аддитивной смеси сигнала с шумом

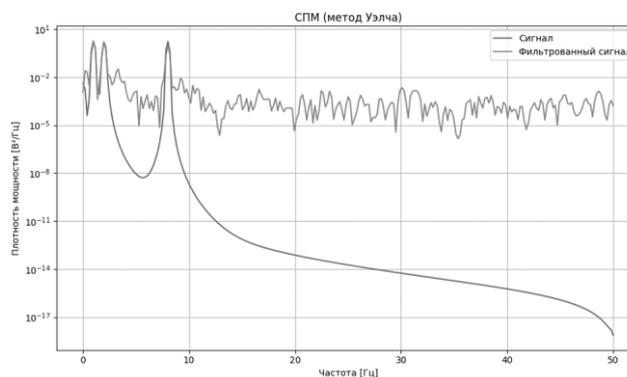


Рис. 10. Спектральная плотность мощности исходного и фильтрованного сигналов

На рис. 11 представлен результат работы на задаче прогнозирования сигнала. В данном случае прогнозируемый сигнал, это зашумленный сигнал нестационарный по мат. ожиданию (с трендом). На рис. 12, показано прогнозирование сигнала со сложным спектральным составом.

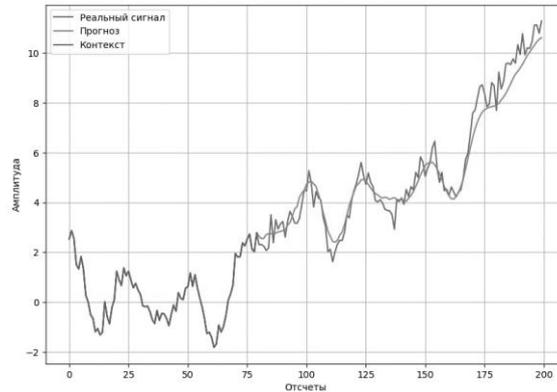


Рис. 11. Задача прогнозирования сигнала (нестационарный сигнал с линейным трендом)

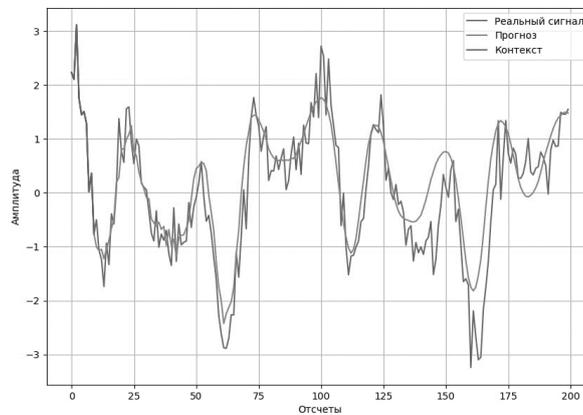


Рис. 12. Задача прогнозирования сигнала (нестационарный сигнал со сложным спектральным составом)

Средняя метрика R2 для задачи прогнозирования составила 0.78, что указывает на то, что 78% дисперсии в предсказанном сигнале объясняется реальными данными. Это является хорошим показателем, демонстрирующим способность модели эффективно предсказывать будущее поведение сигнала. Кроме того, F1-метрика для задачи классификации составила 0.91. F1-метрика представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой, и значение 0.91 указывает на высокую точность и полноту классификации.

Таким образом, результаты, представленные на рис. 4 и 5, демонстрируют высокую эффективность алгоритмов в задачах фильтрации и прогнозирования сигналов. Средние значения метрик R2 и F1 подтверждают успешное выполнение поставленных задач, что свидетельствует о высокой точности и надежности разработанных методов.

Заключение. В данной статье подробно описан метод и алгоритм автоматического извлечения признаков из цифровых сигналов на базе нейросетей трансформер. В качестве задач для обучения алгоритма были выбраны задачи, которые возможно решать с помощью обучения без учителя, такие как задача прогнозирования, фильтрации предварительно зашумленного сигнала, а также классификации (где классы были получены при решении задачи кластеризации на другом признаковом пространстве, в данной работе использовались спектры)

Рассмотренная модификация архитектуры трансформера, включая добавление нелинейного слоя после модуля самовнимания, позволила значительно улучшить способность модели к выявлению сложных и нелинейных зависимостей в данных. Кодирование

позиций в обратной последовательности и разнообразие функций активации в нелинейном слое улучшили обобщающую способность модели. Также была рассмотрена модификация нейросети для работы с мультимодальными входами.

Были получены следующие результаты, для задачи фильтрации метрика R2 составила 0.81, для задачи прогнозирования 0.78, и для задачи классификации F1 мера 0.91. Также на задаче регрессии на сети из двух нелинейных слоев, описанных в данной работе, ошибка MSE составила 0.006, в то время как на двуслойной полносвязной сети 0.053, а на KAN 0.012.

Излеченные признаки с применением данного алгоритма могут быть использованы в последствии для классификации медицинских сигналов, таких как ЭЭГ, ЭКГ, речевой сигнал, данные сейсмографов и так далее. А также для предсказания параметров сигналов и систем, например, для выбора начальных условий при моделировании отраженного сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Галушкин А.И.* Синтез многослойных систем распознавания образов. – 1974. – 368 с.
2. *Jiang A. Q., Sablayrolles A., Roux A., Mensch A., Savary B., Bamford C., Singh Chaplot D., et al.* Mixtral of Experts. – URL: <https://arxiv.org/abs/2401.04088> (дата обращения: 22.10.2024).
3. *Bai J., Bai S., Chu Y., Cui Z., Dang K., Deng X., Fan Y., Ge W., et al.* Qwen Technical Report. – URL: <https://arxiv.org/abs/2309.16609> (дата обращения: 21.10.2024).
4. *Yang A., Yang B., Hui B., Zheng B., Yu B., Zhou C., Li C., Li C., Liu D., et al.* Technical Report. – URL: <https://arxiv.org/abs/2407.10671> (дата обращения: 21.10.2024).
5. *Mnih V., Badia A. P., Mirza M., Graves A., Lillicrap T. P., Harley T., Silver D., Kavukcuoglu K.* Asynchronous Methods for Deep Reinforcement Learning. – URL: <https://arxiv.org/abs/1602.01783> (дата обращения: 22.10.2024).
6. *Jin Y., Li D., A Y., Shi J., Hao P., Sun F., Zhang J., Fang B.* RobotGPT: Robot Manipulation Learning from ChatGPT. – URL: <https://arxiv.org/abs/2312.01421> (дата обращения: 19.10.2024).
7. *Fan A., Lewis M., Dauphin Y.* Hierarchical Neural Story Generation. – URL: <https://arxiv.org/abs/1805.04833> (дата обращения: 20.10.2024).
8. *Holtzman A., Buys J., Du L., Forbes M., Choi Y.* The Curious Case of Neural Text Degeneration. – URL: <https://arxiv.org/abs/1904.09751> (дата обращения: 20.10.2024).
9. *Meister C., Vieira T., Cotterell R.* If beam search is the answer, what was the question?. – URL: <https://arxiv.org/abs/2010.02650> (дата обращения: 21.10.2024).
10. *Liu Z., Wang Y., Vaidya S., Ruehle F., Halverson J., Soljagic M., Hou T. Y., Tegmark M.* KAN: Kolmogorov-Arnold Networks // arXiv preprint. – URL: <https://arxiv.org/abs/2404.19756> (дата обращения: 20.10.2024).
11. *Sinii V., Nikulin A., Kurenkov V., Zisman I., Kolesnikov S.* In-Context Reinforcement Learning for Variable Action Spaces // arXiv preprint. – URL: <https://arxiv.org/abs/2312.13327> (дата обращения: 22.10.2024).
12. *Понимаиш З.А.* Распознавание радиотехнических сигналов с помощью нейронных сетей. – URL: <https://habr.com/ru/articles/318832/> (дата обращения: 20.10.2024).
13. *Ахмед А.Ф., Абдуллах Х.Н., Албакер Б.М.* Классификация сигналов ЭКГ на основе цифровой обработки сигналов, технического выбора функций и радиочастотного классификатора // RENSIT/РЭНСИТ. – 2024. – Т. 16, № 1. – DOI: 10.17725/rensit.2024.16.053.
14. *Дейч А.М.* Методы идентификации динамических объектов. – 1979.
15. *McLean S.M.* Fast algorithms for linear prediction and system identification filters with linear phase // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1982. Dec. – DOI: 10.1109/TASSP.1982.1163987.
16. *Алексеев Д.М., Шумилин А.С., Минюк А.Н., Понимаиш З.А.* Система автоматического поиска участков эпилептической активности в составе облачной платформы хранения, систематизации и обработки медицинских данных // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – Режим доступа: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=37371> (дата обращения: 18.06.2024).
17. *Алексеев Д.М., Шумилин А.С., Минюк А.Н., Понимаиш З.А.* Ансамбль классификаторов: реализация, оценка эффективности и интеграция в облачную платформу хранения, систематизации и обработки медицинских данных // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 9. – С. 20-25.
18. *Алексеев Д.М., Минюк А.Н., Понимаиш З.А., Шумилин А.С.* Разработка и описание структуры и функционала облачной платформы хранения, систематизации и обработки медицинских данных: интеграция системы автоматического поиска участков эпилептической активности // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 3 (77). – С. 52-55.

19. *Shilian Zheng, Xiaoyu Zhou, Shichuan Chen, Peihan Qi, and Xiaoniu Yang.* DemodNet: Learning Soft Demodulation from Hard Information Using Convolutional Neural Network. – 2020.
20. *Zahorian S.A., Zimmer A.M., and Meng F.* Vowel Classification for Computer based Visual Feedback for Speech Training for the Hearing Impaired in ICSLP. – 2002.
21. *Понимаиш З.А.* Разработка алгоритма классификации сигналов на основе нейронных сетей. – 2018. – Режим доступа: <https://hub.lib.sfsedu.ru/repository/material/800841304/> (дата обращения: 18.06.2024).
22. *Fernandez, Santiago, Graves Alex, Schmidhuber Jürgen.* Sequence labelling in structured domains with hierarchical recurrent neural networks // Proceedings of IJCAI. – 2007.
23. *Turker I., Serkan K., Levent E., Askar M., Gabbouj M.* Real-Time Motor Fault Detection by 1D Convolutional Neural Networks // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016.
24. *Yihong D., Ying P., Muqiao Y., Songtao L., Qingjiang S.* Signal Transformer: Complex-valued Attention and Meta-Learning for Signal Recognition. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.04392>. – 2021. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2106.04392> (дата обращения: 18.06.2024).
25. *Jiang Albert Q., Sablayrolles Alexandre, Mensch Arthur, Bamford Chris, Devendra Singh Chaplot, Diego de las Casas, et al.* Mistral 7B. 10.10.23. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.06825> (дата обращения: 18.06.2024).
26. *Понимаиш З.А., Носко В.И.* Алгоритм ранжирования текстов на базе сверточной нейронной сети // Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2022.
27. *Ziming Liu, Yixuan Wang, Sachin Vaidya, Fabian Ruehle, James Halverson, Marin Soljačić, Thomas Y. Hou, Max Tegmark.* KAN: Kolmogorov-Arnold Networks. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19756>. 2021. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2404.19756> (дата обращения: 25.10.2024).

REFERENCES

1. *Galushkin A.I.* Sintez mnogosloynnykh sistem raspoznavaniya obrazov [Synthesis of multilayer systems for pattern recognition], 1974, 368 p.
2. *Jiang A.Q., Sablayrolles A., Roux A., Mensch A., Savary B., Bamford C., Singh Chaplot D., et al.* Mistral of Experts. Available at: <https://arxiv.org/abs/2401.04088> (accessed 22 October 2024).
3. *Bai J., Bai S., Chu Y., Cui Z., Dang K., Deng X., Fan Y., Ge W., et al.* Qwen Technical Report. Available at: <https://arxiv.org/abs/2309.16609> (accessed 21 October 2024).
4. *Yang A., Yang B., Hui B., Zheng B., Yu B., Zhou C., Li C., Li C., Liu D., et al.* Technical Report. Available at: <https://arxiv.org/abs/2407.10671> (accessed 21 October 2024).
5. *Mnih V., Badia A. P., Mirza M., Graves A., Lillicrap T. P., Harley T., Silver D., Kavukcuoglu K.* Asynchronous Methods for Deep Reinforcement Learning. Available at: <https://arxiv.org/abs/1602.01783> (accessed 22 October 2024).
6. *Jin Y., Li D., A Y., Shi J., Hao P., Sun F., Zhang J., Fang B.* RobotGPT: Robot Manipulation Learning from ChatGPT. Available at: <https://arxiv.org/abs/2312.01421> (accessed 19 October 2024).
7. *Fan A., Lewis M., Dauphin Y.* Hierarchical Neural Story Generation. Available at: <https://arxiv.org/abs/1805.04833> (accessed 20 October 2024).
8. *Holtzman A., Buys J., Du L., Forbes M., Choi Y.* The Curious Case of Neural Text Degeneration. Available at: <https://arxiv.org/abs/1904.09751> (accessed 20 October 2024).
9. *Meister C., Vieira T., Cotterell R.* If beam search is the answer, what was the question?. Available at: <https://arxiv.org/abs/2010.02650> (accessed 21 October 2024).
10. *Liu Z., Wang Y., Vaidya S., Ruehle F., Halverson J., Soljacic M., Hou T. Y., Tegmark M.* KAN: Kolmogorov-Arnold Networks, *arXiv preprint*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2404.19756> (accessed 20 October 2024).
11. *Sinii V., Nikulin A., Kurenkov V., Zisman I., Kolesnikov S.* In-Context Reinforcement Learning for Variable Action Spaces, *arXiv preprint*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2312.13327> (accessed 22 October 2024).
12. *Ponimash Z.A.* Raspoznavanie radiotekhnicheskikh signalov s pomoshch'yu neyronnykh setey [Recognition of radio-technical signals using neural networks]. Available at: <https://habr.com/ru/articles/318832/> (accessed 20 October 2024).
13. *Akhmed A.F., Abdullakh Kh.N., Albaker B.M.* Klassifikatsiya signalov EKG na osnove tsifrovoy obrabotki signalov, tekhnicheskogo vybora funktsiy i radiochastotnogo klassifikatora [ECG Signal Classification Based on Digital Signal Processing, Feature Selection, and Radio Frequency Classifier], *RENSIT/RENSIT* [RENSIT], 2024, Vol. 16, No. 1. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.053.
14. *Deych A.M.* Metody identifikatsii dinamicheskikh ob"ektov [Methods for identifying dynamic objects], 1979.

15. *McLean S.M.* Fast algorithms for linear prediction and system identification filters with linear phase, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1982. Dec. DOI: 10.1109/TASSP.1982.1163987.
16. *Alekseev D.M., Shumilin A.S., Minyuk A.N., Ponimash Z.A.* Sistema avtomaticheskogo poiska uchastkov epilepticheskoy aktivnosti v sostave oblachnoy platformy khraneniya, sistematizatsii i obrabotki meditsinskikh dannykh [Automatic search system for epileptic activity areas as part of a cloud platform for storing, systematizing and processing medical data], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies], 2019. Available at: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=37371> (accessed 18 June 2024).
17. *Alekseev D.M., Shumilin A.S., Minyuk A.N., Ponimash Z.A.* Ansambli' klassifikatorov: realizatsiya, otsenka effektivnosti i integratsiya v oblachnyuyu platformu khraneniya, sistematizatsii i obrabotki meditsinskikh dannykh [Ensemble of classifiers: implementation, efficiency evaluation and integration into a cloud platform for storing, systematizing and processing medical data], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies], 2019, No. 9, pp. 20-25.
18. *Alekseev D.M., Minyuk A.N., Ponimash Z.A., Shumilin A.S.* Razrabotka i opisaniye struktury i funktsionala oblachnoy platformy khraneniya, sistematizatsii i obrabotki meditsinskikh dannykh: integratsiya sistemy avtomaticheskogo poiska uchastkov epilepticheskoy aktivnosti [Development and description of the structure and functionality of a cloud platform for storing, systematizing and processing medical data: integration of a system for automatic search for areas of epileptic activity], *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control Systems and Information Technologies], 2019, No. 3 (77), pp. 52-55.
19. *Shilian Zheng, Xiaoyu Zhou, Shichuan Chen, Peihan Qi, and Xiaoniu Yang.* DemodNet: Learning Soft Demodulation from Hard Information Using Convolutional Neural Network, 2020.
20. *Zahorian S.A., Zimmer A.M., and Meng F.* Vowel Classification for Computer based Visual Feedback for Speech Training for the Hearing Impaired in ICSLP, 2002.
21. *Ponimash Z.A.* Razrabotka algoritma klassifikatsii signalov na osnove neyronnykh setey [Development of a signal classification algorithm based on neural networks], 2018. Available at: <https://hub.lib.sfedu.ru/repository/material/800841304/> (accessed 18 June 2024).
22. *Fernandez, Santiago, Graves Alex, Schmidhuber Jürgen.* Sequence labelling in structured domains with hierarchical recurrent neural networks, *Proceedings of IJCAI*, 2007.
23. *Turker I., Serkan K., Levent E., Askar M., Gabbouj M.* Real-Time Motor Fault Detection by 1D Convolutional Neural Networks, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016.
24. *Yihong D., Ying P., Muqiao Y., Songtao L., Qingjiang S.* Signal Transformer: Complex-valued Attention and Meta-Learning for Signal Recognition. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.04392>, 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2106.04392> (accessed 18 June 2024).
25. *Jiang Albert Q., Sablayrolles Alexandre, Mensch Arthur, Bamford Chris, Devendra Singh Chaplot, Diego de las Casas, et al.* Mistral 7B. 10.10.23. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.06825> (accessed 18 June 2024).
26. *Ponimash Z.A., Nosko V.I.* Algoritm ranzhirovaniya tekstov na baze svertochnoy neyronnoy seti [Text ranking algorithm based on a convolutional neural network], *Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation]: in 2 vol. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2022.
27. *Ziming Liu, Yixuan Wang, Sachin Vaidya, Fabian Ruehle, James Halverson, Marin Soljačić, Thomas Y. Hou, Max Tegmark.* KAN: Kolmogorov-Arnold Networks. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19756>. 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2404.19756> (accessed 25 October 2024).

Понимаш Захар Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: ponimashz@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79885464739; аспирант; генеральный директор ООО «ФракталТех».

Потанин Марат Владимирович – МИРЭА - Российский технологический университет; e-mail: potaninmt@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79777999950; магистрант.

Ponimash Zahar Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: ponimashz@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885464739; graduate student; general director of FractalTech LLC.

Potanin Marat Vladimirovich – MIREA – Russian Technological University; e-mail: potaninmt@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79777999950; master's student.

Г.А. Хришкевич, Д.А. Андреев, Л.В. Мотайленко, Ю.В. Бруттан, О.Н. Тимофеева

**МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Задача восстановления утраченных фрагментов монументальной живописи является актуальной в контексте сохранения объектов культурного наследия. Современные технологии искусственного интеллекта, включая свёрточные нейронные сети (СНС), значительно расширяют возможности реставрации, позволяя автоматизировать сложные процессы восстановления изображений. В частности восстановление утраченных элементов фресок требует точных инструментов анализа, которые могут предсказать недостающие фрагменты с минимальными ошибками, сохраняя художественный стиль оригинала. Целью данного исследования является разработка методики автоматизированного восстановления утраченных фрагментов изображений монументальной живописи с использованием СНС (на примере фресок). Обозначенная цель достигнута путём решения следующих задач: получение изображений фресок с использованием соответствующих методологических и технических средств, применение архитектуры U-Net для сегментации и реконструкции изображений, прогнозирование утраченных участков на основе анализа цветовых характеристик. Метод фотограмметрии и спроектированное приспособление, которые были использованы для осуществления многоакурсной съёмки, обеспечили получение высококачественных исходных данных для последующей обработки. Адаптация архитектуры U-Net применительно к задаче сегментации изображений доказала свою эффективность при выделении ключевых структурных элементов фресок, что способствовало точной реконструкции утраченных областей. Для прогнозирования утраченных участков проводился анализ цветовых характеристик в системе HSL, что позволило СНС предсказывать недостающие цвета с высокой степенью точности. Краткие выводы исследования показывают, что предложенная методика позволяет восстановить как форму, так и цвет утраченных фрагментов фресок. Предложенную методику планируется использовать для реставрации произведений искусства других типов, что делает её перспективной для дальнейших исследований.

Изображение; свёрточная нейронная сеть; восстановление; фреска.

G.A. Khrishkevich, D.A. Andreev, L.V. Motaylenko, I.V. Bruttan, O.N. Timofeeva

**THE TECHNIQUE OF AUTOMATED IMAGE RESTORATION USING
CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS**

The task of restoring lost fragments of monumental painting is relevant in the context of preserving cultural heritage sites. Modern artificial intelligence technologies, including convolutional neural networks (CNN), significantly expand the possibilities of restoration, allowing for the automation of complex image restoration processes. In particular, the restoration of lost elements of frescoes requires precise analysis tools that can predict missing fragments with minimal errors, while preserving the artistic style of the original. The purpose of this study is to develop a technique of automated restoration of lost fragments of monumental painting images using CNN (using frescoes as an example). This goal was achieved by solving the following problems: obtaining fresco images using appropriate methodological and technical tools, applying the U-Net architecture for image segmentation and reconstruction, predicting lost areas based on color characteristic analysis. The photogrammetry method and the designed device, which were used to perform multi-angle shooting, provided high-quality source data for subsequent processing. Adaptation of the U-Net architecture to the image segmentation task has proven its effectiveness in identifying key structural elements of frescoes, which contributed to the accurate reconstruction of lost areas. To predict the lost areas, color characteristics were analyzed in the HSL system, which allowed the CNN to predict the missing colors with a high degree of accuracy. Brief conclusions of the study show that the proposed technique allows restoring both the shape and color of lost fragments of frescoes. The proposed technique is planned to be used for the restoration of other types of art works, which makes it promising for further research.

Image; convolutional neural network; restoration; fresco.

Введение. Изображения монументальной живописи, являясь важной частью культурного наследия, часто подвергаются разрушению и утрате отдельных фрагментов. Современные технологии предлагают новые подходы для решения задачи восстановления таких утраченных элементов.

Итак, объектом исследования в данной работе являются изображения монументальной живописи, а именно их утраченные фрагменты, которые подлежат восстановлению.

Одним из самых перспективных подходов для восстановления изображений является использование методов искусственного интеллекта, в частности СНС, которые способны эффективно анализировать сложные структуры изображений.

Таким образом, предметом исследования является процесс автоматизированного восстановления изображений монументальной живописи с использованием СНС и других современных методов машинного обучения.

Краткий анализ подходов к автоматизированному восстановлению изображений монументальной живописи. Существует множество различных типов нейронных сетей, которые используют для распознавания изображений, но СНС являются одной из наиболее эффективных архитектур, благодаря способности к автоматизированному извлечению признаков, локальной обработке изображений и масштабируемости, а также учёту двумерной топологии данных [1]. Архитектура СНС также обеспечивает устойчивость к различным искажениям, таким как масштаб, сдвиги и повороты, за счёт использования локальных рецепторных полей и иерархической организации обработки данных [2].

В настоящее время спектр практического использования нейронных сетей весьма широк. Например, в работах [3–5] рассматривается успешное применение нейронных сетей для задач классификации, распознавания лица, голоса, текста. Авторами в [6, 7] предложены методы использования нейронных сетей для распознавания рентгенограмм, причем в работах [8, 9] говорится об использовании архитектуры U-Net для сегментации медицинских изображений, что указывает на перспективность применения данной архитектуры для восстановления также высоко детализированных изображений монументальной живописи.

В работе [10] показана возможность применения нейронных сетей для анализа стиля произведений живописи, что подтверждает потенциал их практического использования в области изобразительного искусства. Наиболее близкая к теме настоящего исследования работа [11] описывает применение компьютерных графических приложений для реставрации русской иконы, однако для реставрации фресок использовалось специализированное программное средство, а не нейросеть. В то же время данные, полученные автором, говорят о возможности применения технологий нейросетей в реставрации, что в перспективе позволит говорить о выходе на концептуально новый уровень в вопросе восстановления утраченных фрагментов настенных изображений. Также заслуживает внимания работа [12], в которой описывается использование датасета изображений старинных керамических изделий. Работа велась при малой обучающей выборке, что демонстрирует потенциал методов глубокого обучения даже в условиях ограниченного объёма данных.

Таким образом, проведённый анализ позволяет сформулировать цель данного исследования как разработку методики автоматизированного восстановления утраченных фрагментов изображений монументальной живописи с использованием СНС (на примере фресок).

Общая постановка задачи исследования. Восстановление утраченных фрагментов изображений монументальной живописи требует использования методов, позволяющих предсказывать утраченные элементы с высокой степенью точности и сохранением художественного стиля.

Формально задача определяется следующим образом:

1) Входные данные:

- ◆ $I(i, j)$: изображение, где $I(i, j)$ – цвет пикселя в позиции (i, j) , представленный в системе HSL;
- ◆ $M(i, j)$: маска утраченных областей, где $M(i, j)=1$, если пиксель (i, j) принадлежит утраченной области, и $M(i, j)=0$, если пиксель не повреждён.

2) Целевые данные: восстановленное изображение $I'(i, j)$, где для всех (i, j) , таких что $M(i, j)=1$, выполняется $I'(i, j) \approx I(i, j)$ с допустимой ошибкой $D < 10\%$.

3) Цель задачи: минимизация функции потерь:

$$E = \frac{1}{|M|} \sum_{(i,j) \in M} |I'(i, j) - I(i, j)|, \quad (1)$$

где $|M|$ – количество пикселей в утраченной области;

$|I'(i, j) - I(i, j)|$ – евклидово расстояние в пространстве HSL, вычисляемое как:

$$|I'(i, j) - I(i, j)| = \sqrt{(H' - H)^2 + (S' - S)^2 + (L' - L)^2}, \quad (2)$$

где H', S', L' и H, S, L – компоненты восстановленного и исходного цветов соответственно.

Таким образом, разработка заявленной методики включает решение следующих задач: получение изображений фресок с использованием соответствующих методологических и технических средств; применение архитектуры U-Net для сегментации и реконструкции изображений; прогнозирование утраченных участков на основе анализа цветовых характеристик.

Описание методики автоматизированного восстановления изображений монументальной живописи. Процесс реставрации занимает продолжительный период времени, поскольку требуется не только расчистка осколков фресок, но и распознавание имеющихся на них изображений [13]. Использование нейросетевых технологий не заменит работу реставраторов, а лишь ускорит и упростит их труд.

Первым этапом в реализации указанной методики является получение изображений для последующего восстановления с использованием СНС. Поскольку в цели данного исследования говорится о восстановлении изображений разрушенных фресок, а не о выполнении полной реставрации, то в этом случае лучшим способом будет использование обычного фотографирования поверхности. В качестве наиболее подходящего варианта автоматизации данного процесса было решено обратиться к методу фотограмметрии [14].

С учётом содержания цели исследования из данного метода было решено использовать ряд процедур, таких как: захват изображений из разных точек обзора с полным покрытием опознаваемых объектов; ориентация и позиционирование изображений относительно друг друга; извлечение ключевых особенностей на каждом изображении.

Способ получения изображений, подразумевающий захват из разных точек хорошо подходит, т.к. для следующей работы СНС нужны сегментированные изображения, также таким образом можно увеличить качество изображений. Практика показывает, что один единственный снимок фрески размером 2 x 1 метр даже при использовании новейших камер не даёт такого качества, которое способна создать сегментированная съёмка. Также ориентация в пространстве и извлечение особенностей изображений подходят для точного получения цифровых снимков.

Следующим шагом этапа получения изображений является проектирование приспособления [15]. В условиях имеющейся экономии было принято решение использовать универсальные, стандартные материалы, предусматривающие возможность настройки и регуляции. В первую очередь, стенд с оборудованием представляет собой камеру, находящуюся над столом с разрушенной фреской. Камера передвигается над столом по секторам, делая одно изображение за сектор.

Положение камеры на любом этапе движения можно описать координатами (x_i, y_j) , где i и j – индексы текущего сектора по осям x и y соответственно. Шаг перемещения можно представить следующим образом: пусть размеры одного сектора по осям x и y составляют Δx и Δy соответственно. Тогда движение камеры осуществляется по следующей траектории:

$$\begin{aligned} x_i &= x_0 + i * \Delta x \\ y_j &= y_0 + j * \Delta y, \end{aligned} \quad (3)$$

где x_0 и y_0 – начальные координаты камеры.

Перемещение камеры по секторам происходит в две фазы:

1) сначала по оси x с шагом Δx , снимая каждый сектор в строке;

- 2) затем она смещается по оси y на шаг Δy , после чего процесс повторяется для следующей строки секторов.

$$\text{Траектория} = \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{i=0}^{N_x} (x_i, y_j), \quad (4)$$

где N_x и N_y – количество секторов по осям x и y соответственно.

Ограничение конструкции представляет собой пределы перемещения камеры по размерам рамы $L_x \times L_y$:

$$\begin{aligned} 0 &\leq x_i \leq L_x \\ 0 &\leq y_j \leq L_y, \end{aligned} \quad (5)$$

где L_x и L_y – длина и ширина рамы соответственно.

Принцип перемещения похож на движение мостового крана: длинный мост с подвижной камерой и двумя рельсами, по которым перемещается аппарат. Конструкция в большей степени состоит из алюминиевых стержней или регулируемых подставок, чтобы можно было правильно выставить рабочую высоту съёмки. Площадь покрытия регулируется заменой направляющих для камеры и заменой стола для большого количества осколков. Прототип представлен на рис. 1.

Второй этап методики предполагает использование СНС с архитектурой U-Net для сегментации и реконструкции изображений. Применение данной архитектуры обусловлено тем обстоятельством, что на практике подобные СНС демонстрируют высокую эффективность в задачах распознавания и выделения ключевых элементов на изображениях [16].

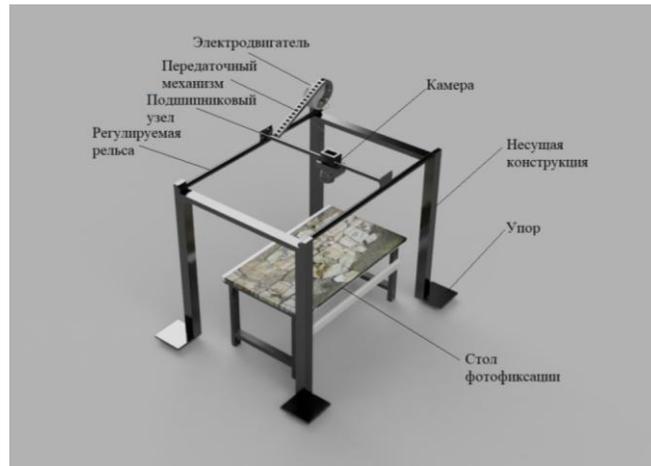


Рис. 1. Прототип приспособления для получения цифровых изображений фресок

Архитектура U-Net состоит из двух частей: контрактирующей (сжатие) и расширяющей (восстановление). В первой части используются свёртки и операции подвыборки для извлечения ключевых признаков изображений. В контексте данной модели были применены стандартные настройки U-Net для контрактирующей части, т.к. они уже зарекомендовали себя в качестве эффективного метода по анализу изображений, позволяющего сохранить важные признаки без необходимости дополнительной настройки.

Во второй части происходит восстановление разрешения изображений с помощью транспонированных свёрток, что позволяет восстанавливать утраченные участки с учётом текстурных и цветовых характеристик исходных изображений. Восстановление изображения в U-Net с использованием транспонированных свёрток представляется следующим образом:

$$O_{up}(i, j) = \sum_{m=0}^{k-1} \sum_{n=0}^{k-1} O(i-m, j-n) K_{mn}, \quad (6)$$

где $O_{up}(i, j)$ – результат восстановления изображения на позиции (i, j) ;

$O(i - m, j - n)$ – исходные данные изображения до свёртки;

K_{mn} – элемент фильтра на позиции (m, n) , который отвечает за выбор соответствующих значений при свёртке.

На этом этапе U-Net используется для точного выделения ключевых элементов и границ фресок, что создаёт основу для дальнейшей реконструкции повреждённых участков.

С целью оптимизации работы сети применяется алгоритм градиентного спуска [17], который минимизирует функцию потерь:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{r,s} (p_{rs} - q_{rs})^2, \quad (7)$$

где $E(w)$ – функция потерь, которая минимизируется для улучшения работы сети;

w – веса СНС, настраиваемые при обучении;

p_{rs} – предсказанное значение СНС на выходе для объекта r и класса s ;

q_{rs} – ожидаемое (целевое) значение для объекта r и класса s .

Далее необходимо произвести обновление весов, что позволяет определить силу связи между нейронами. Они играют ключевую роль в процессе обучения модели, т.к. управляют тем, как входные данные преобразуются в выходные. В ходе обучения сети веса корректируются для минимизации разницы между предсказанным и ожидаемым значениями. Цель этих корректировок – сделать сеть более точной в своих прогнозах. Веса обновляются на каждом этапе обучения с использованием оптимизационных алгоритмов, таких как градиентный спуск. Для обновления весов используется правило:

$$w^{(t+1)} = w^{(t)} - \eta \frac{\delta E}{\delta w}, \quad (8)$$

где $w^{(t)}$ – значение весов на шаге t ;

$w^{(t+1)}$ – обновлённые значения весов на шаге $t + 1$;

η – скорость обучения;

$\frac{\delta E}{\delta w}$ – градиент функции потерь по отношению к весам, показывающий направление, в котором нужно изменить веса для минимизации ошибки.

Математически работу свёрточного слоя можно описать как свёртку фильтра K с входным изображением I :

$$O_{i,j} = \sum_{m=0}^{k-1} \sum_{n=0}^{k-1} I_{i+m,j+n} K_{mn}. \quad (9)$$

где $O_{i,j}$ – выход свёрточного слоя в позиции (i, j) ;

$I_{i+m,j+n}$ – значение интенсивности (яркости) пикселя в позиции $(i+m, j+n)$ на входном изображении, где m и n являются смещениями по горизонтали и вертикали относительно центральной точки позиции (i, j) на выходе свёрточного слоя.

K_{mn} – элемент фильтра на позиции (m, n) , который отвечает за выбор соответствующих значений при свёртке.

После применения свёртки используется функция активации *ReLU* (Rectified Linear Unit). Данная функция применяется на каждом слое для того, чтобы ввести нелинейность в модель. Это важно, т.к. без нелинейности СНС свелась бы к обычной линейной модели, не способной обучаться сложным зависимостям:

$$f(x) = \max(0, x). \quad (10)$$

Это позволяет модели быстрее сходиться при обучении и улучшает её способность к обобщению.

Таким образом, рассмотрев возможность внедрения установки для автоматизированного получения изображений фресок и определив возможность обучения СНС, можно перейти к её построению, что послужит основой для реализации третьего этапа методики.

В связи с техническими ограничениями и спецификой составления методики было принято решение создать базовую СНС лишь для демонстрации функционала данной технологии.

В качестве тестового решения была спроектирована СНС в среде Google Colab, для проверки её обучаемости на протяжении 300 эпох, что было выбрано в качестве оптимального значения для начального тестирования. Данный выбор основан на том, что при большем количестве эпох процесс обучения мог бы привести к переобучению, а меньшее количество не дало бы возможности достичь достаточного уровня сходимости модели для получения корректных данных об ошибках.

В результате проведённых экспериментов были получены данные об ошибках, которые использовались для дальнейшей классификации информации. На рис. 2 представлена структура СНС, включающая полносвязный и свёрточный слои архитектуры, что позволяет эффективно обучать сеть для восстановления изображений фресок. Эти слои способствуют глубинной обработке изображений, что улучшает способность модели к восстановлению утраченных фрагментов.

```
model = tf.keras.models.Sequential([
    tf.keras.layers.Dense(128, input_shape=(9,), activation='tanh'),
    tf.keras.layers.Dense(128, input_shape=(128,), activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(1)
])

opt = tf.keras.optimizers.Adam()
model.compile(optimizer=opt, loss='mse')
r = model.fit(X_train, y_train, epochs=300)
model.evaluate(X_test, y_test, verbose=2)
```

```
Epoch 1/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 558.0015
Epoch 2/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 505.5035
Epoch 3/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 450.1016
Epoch 4/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 382.1041
Epoch 5/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 297.4134
Epoch 6/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 203.6768
Epoch 7/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 119.3603

Epoch 297/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 4.6717
Epoch 298/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 4.6435
Epoch 299/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 4.7865
Epoch 300/300
8/8 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 5.2216
4/4 - 0s - loss: 6.2365 - 196ms/epoch - 49ms/step
6.236506938934326
```

Рис. 2. Структура построенной СНС

Обратимся к анализу графика изменения функции потерь в процессе обучения СНС (рис. 3). По горизонтальной оси отложено количество эпох обучения, в интервале от 0 до 300, с шагом в одну эпоху. Ось по вертикали отображает значения функции потерь, которые постепенно снижаются от 558 до 5 (рис. 2). Таким образом, по мере увеличения количества эпох потери закономерно уменьшаются, что демонстрирует стабильную работу алгоритма оптимизации. В конце обучения среднее квадратичное отклонение составляет порядка 6,2 (рис. 2), что свидетельствует о хорошем уровне точности модели при восстановлении изображений [18]. Этот результат указывает на то, что сеть успешно обучена на задаче реконструкции утраченных фрагментов, и минимизирована ошибка между реальными и предсказанными данными.

Целью этой СНС является прогнозирование цвета на полученных фотографиях. Имея разрушенные фрески, можно достраивать изображения не только применяя моделирование, но и воспользоваться прогнозированием цветовой гаммы. Предлагается зашифровать цвет в системе кодирования HSL [19] и спрогнозировать, какими должны быть разрушенные части фресок. Существуют примеры использования RGB кодировки при похожей задаче [20], но в данном случае было принято решение использовать HSL, т.к. этот формат точнее передаст насыщенность и яркость, что в свою очередь важно при работе с монументальной живописью.

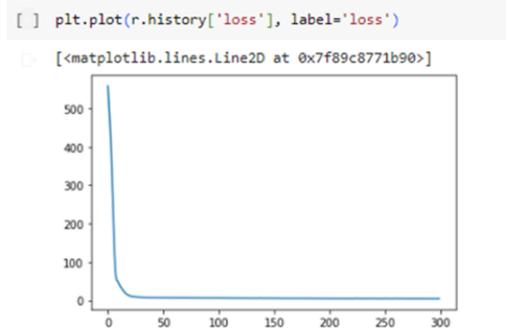


Рис. 3. График изменения функции потерь

На рис. 4 показана способность СНС прогнозировать цвет, зашифрованный с помощью формата HSL. На оси X представлены точки, выбранные случайным образом на фотографии фрески, по оси Y отложен цветовой диапазон, зашифрованный в формате HSL. Зелёным цветом обозначены оригинальные значения HSL для исходных фрагментов изображения, а красным цветом — предсказанные СНС значения (NEW_HSL).

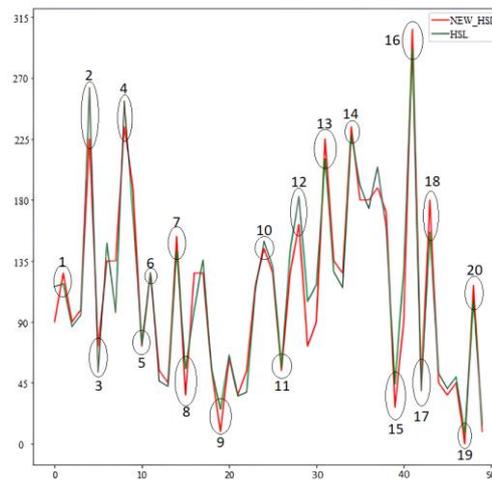


Рис. 4. Гистограмма цветового диапазона HSL

В табл. 1 приведены значения оригинальных и предсказанных данных по 20 наиболее ярко выраженным точкам на гистограмме цветового диапазона HSL (рис. 4). Эти значения позволяют оценить точность прогнозов по ключевым участкам, в которых расхождения с исходными цветами могут оказывать наиболее заметное влияние. В целях оценки точности прогнозов была рассчитана степень расхождения значений:

$$D_{middle} = \frac{\sum_{a=1}^{20} \left(\frac{HSL_a - NEW_HSL_a}{HSL_a} \right)}{20} * 100\% , \quad (11)$$

где D_{middle} – средняя величина степени расхождения значений в выбранных точках;
 HSL_a и NEW_HSL_a – оригинальное и предсказанное значения цветового диапазона HSL в конкретной точке соответственно.

Рассчитанное значение D_{middle} составило порядка 8,5%, что является хорошим результатом, учитывая сложность задачи и начальный этап тестирования сети. Такой уровень D_{middle} демонстрирует, что разработанная СНС может достигать достаточно высокого уровня точности в прогнозировании цветовых характеристик, что особенно важно для задач реставрации фресок, где требуется соблюдение оригинальной цветовой гаммы.

Таблица 1

Значения и степень расхождения точек в цветовом диапазоне HSL

	HSL	NEW_HSL	D, %
1	120	128	-6,7
2	266	225	15,4
3	54	74	-37,0
4	252	237	6,0
5	76	74	2,6
6	128	128	0,0
7	144	155	-7,6
8	57	38	33,3
9	27	10	63,0
10	151	145	4,0
11	68	66	2,9
12	182	164	9,9
13	214	225	-5,1
14	228	234	-2,6
15	45	30	33,3
16	295	310	-5,1
17	41	41	0,0
18	158	180	-13,9
19	10	1	90,0
20	105	118	-12,4

Таким образом, тестируемая СНС способна к обучению, что говорит о её потенциальном использовании. В рамках данной статьи основной акцент был сделан на разработке методики и проведении экспериментов, демонстрирующих возможность обучения СНС для восстановления изображений монументальной живописи (на примере фресок).

Заключение. В результате проведённого исследования была разработана методика автоматизированного восстановления утраченных фрагментов изображений монументальной живописи с использованием СНС (на примере фресок), которая включает три укрупнённых этапа.

Первый этап заключается в получении изображений фресок с использованием метода фотограмметрии и спроектированного приспособления. Этот подход позволяет достичь высокой точности при съёмке изображений с различных точек обзора. Многокурсовая съёмка и ориентация изображений в пространстве обеспечивают непрерывность визуальных данных, что позволяет получить высококачественные исходные данные для последующей обработки.

На втором этапе была применена архитектура U-Net для задачи сегментации изображений фресок. Адаптация данной архитектуры включала настройку транспонированных свёрток для решения специфических задач восстановления фресок, что позволило достичь высокой точности при распознавании границ изображений.

Третьим этапом стало создание и тестирование СНС, предназначенной для прогнозирования утраченных участков фресок с помощью HSL-кодировки. СНС обучалась на протяжении 300 эпох, при этом по мере роста шагов обучения значения функции потерь существенно снижались. Средняя величина степени расхождения оригинальных и предсказанных значений в выбранных точках цветового диапазона HSL составила 8,5%. Данная количественная оценка подтверждает высокую точность разработанной СНС в задаче восстановления цветовой гаммы фресок.

Ключевыми факторами, определяющими научную новизну представленной работы, являются:

1. Комплексность подхода. Разработана методика, объединяющая фотограмметрию и СНС, что позволяет повысить точность процесса реставрации фресок. В целях автоматизации данного процесса создано аппаратное решение для получения изображений с высокой степенью детализации, что повышает качество данных для обучения нейронной сети.

2. Адаптация архитектуры U-Net. Проведена настройка архитектуры U-Net на задачи реставрации фресок, что ранее не применялось для подобных объектов монументальной живописи. Для восстановления утраченных фрагментов фресок применены транспонированные свёртки с сохранением текстурных и цветовых характеристик.

3. Использование HSL-кодировки. Осуществлено прогнозирование цветовой гаммы в системе HSL для более точной реконструкции, что является инновационным решением по сравнению с использованием стандартной RGB-кодировки. Выбранная модель кодировки позволяет более точно передать насыщенность и яркость, что является критически важным для задач реставрации фресок.

Таким образом, предложенная методика обладает высоким потенциалом для практического применения в реставрации фресок. В дальнейшем планируется улучшать качество восстанавливаемых изображений путём обучения СНС на большем количестве эпох и применения более сложных алгоритмов предобработки данных, а также адаптировать СНС для специфических задач восстановления других видов изображений монументальной живописи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сикорский О.С.* Обзор свёрточных нейронных сетей для задачи классификации изображений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2017. – № 20. – С. 37-42.
2. *Sulavko A.E., Lozhnikov P.S., Choban A.G., Stadnikov D.G., Nigrey A.A., Inivatov D.P.* Evaluation of EEG identification potential using statistical approach and convolutional neural networks // Information and Control Systems. – 2020. – No. 6 (109). – P. 37-49.
3. *Маркин Е.И., Зупарова В.В., Мартышкин А.И.* Исследование возможности применения нейронных сетей для восстановления изображения лица в системах распознавания // Тр. ИСП РАН. – 2022. – Т. 34. – Вып. 6. – С. 117-126.
4. *Vishniakou U.A., Shaya B.H.* Voice Detection Using Convolutional Neural Network // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 114-120.
5. *Гусейнов С.Б., Менгель В.В., Орозкожоев Д.С.* Использование интеллектуальных систем при распознавании текста на изображении // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Разакова. – 2022. – № 1 (61). – С. 46-52.
6. *Борисов А.А., Васильев Ю.А., Владзимирский А.В., Омелянская О.В., Семенов С.С., Арзамасов К.М.* Использование нейронных сетей для поиска нарушений укладки пациента на рентгенограммах органов грудной клетки // Программные системы: теория и приложения. – 2023. – Т. 14, № 3 (58). – С. 95-113.
7. *Акутин А.С., Горякин М.В., Зубавленко Р.А., Печенкин В.В., Солопкин Д.А.* Использование искусственных нейронных сетей для выполнения сегментации рентгенограмм тазобедренного сустава при лечении остеоартрита // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12, № 1 (44). – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1486> (дата обращения: 12.09.2024).
8. *Дорошкин Н.В., Образцов В.А.* Распознавание образов на медицинских изображениях с помощью нейронной сети // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 4. – С. 941-948.
9. *Kakutani A.K., Sree L.P.* BRB U-Net: Bottleneck Residual Blocks in U-Net for Light-Weight Semantic Segmentation // International Journal of Computer Applications. – 2022. – Vol. 184, No. 33. – P. 63-67.

10. Ковалев В.Ю., Шишкин А.Г. Распознавание стиля произведений живописи по их изображениям с помощью глубоких нейронных сетей // Информатика и системы управления. – 2020. – № 3 (65). – С. 74-86.
11. Филина О.С. Возможности применения компьютерных графических приложений в реставрации и реконструкции русской иконы // Инновационный дискурс развития современной науки: Сб. статей V Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск, 2021. – С. 166-175.
12. Рассолова В.М., Позднякова Е.Д., Лоторева В.В. Исследование эффективности архитектур сверточных нейронных сетей в решении задачи классификации при малой обучающей выборке // Auditorium. – 2023. – № 2 (38). – С. 73-81.
13. Бурый В.П., Борисова Н.Л. Работы по реставрации фрагментов древнерусских стенописей в МГХПА им. С.Г. Строганова. Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. Вестник РГХПУ им. С.Г. Строганова. – 2019. – № 3-1. – С. 21-36.
14. Иванов П.В., Тарасов А.В. Фотограмметрия – новая жизнь старой технологии (принципы и приложение для поисков МПИ) // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных, цветных металлов и алмазов: Сборник тезисов докладов VII научно-практической конференции. – М., 2017. – С. 118.
15. Хришкевич Г.А. Информационные процессы восстановления изображений монументальной живописи // Молодёжь-науке: Матер. молодежных научно-практических конференций Псковского государственного университета по итогам научно-исследовательской работы в 2021/2022 учебном году. – Псков, 2022. – Т. II. – С. 134-137.
16. Hao X., Yin L., Li X. et al. A Multi-Objective Semantic Segmentation Algorithm Based on Improved U-Net Networks // Remote Sensing. – 2023. – 15 (7), 1838.
17. Li M., Liu X., Zhang A. et al. Testing of the stochastic parallel gradient descent algorithm to the alignment of a two-mirror telescope // Journal of Optical Technology. – 2020. – 87 (5). – P. 276-283
18. Mallaev A.R., Juraev F.D., Ochilov M.A. Improvement of control models of closed systems using neural networks // Innovatsion texnologiyalar. – 2023. – No. 3. – P. 17-26.
19. Проскуряков Н.Е., Яковлев Б.С., Архангельская Н.Н. Определение параметров, влияющих на время расчета среднего цвета изображения // Проблемы машиноведения: Материалы III Международной научно-технической конференции. – Омск, 2019. – Ч. II. – С. 342-350.
20. Зоткина А.А., Холкина В.М. Распознавание изображений с помощью сверточных нейронных сетей // Современные информационные технологии. – 2023. – № 38 (38). – С. 60-63.

REFERENCES

1. Sikorskiy O.S. Obzor svrtochnykh neyronnykh setey dlya zadachi klassifikatsii izobrazheniy [Review of convolutional neural networks for image classification], *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New information technologies in automated systems], 2017, No. 20, pp. 37-42.
2. Sulavko A.E., Lozhnikov P.S., Choban A.G., Stadnikov D.G., Nigrey A.A., Inivatov D.P. Evaluation of EEG identification potential using statistical approach and convolutional neural networks, *Information and Control Systems*, 2020, No. 6 (109), pp. 37-49.
3. Markin E.I., Zuparova V.V., Martyshkin A.I. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya neyronnykh setey dlya vosstanovleniya izobrazheniya litsa v sistemakh raspoznavaniya [Study of the possibility of using neural networks for facial image restoration in recognition systems], *Tr. ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2022, Vol. 34, Issue 6, pp. 117-126.
4. Vishniakou U.A., Shaya B.H. Voice Detection Using Convolutional Neural Network, *Doklady BGUIR* [Reports of BSUIR], 2023, Vol. 21, No. 2, pp. 114-120.
5. Guseynov S.B., Mengel' V.V., Orozkozhoev D.S. Ispol'zovanie intellektual'nykh sistem pri raspoznavanii teksta na izobrazhenii [Using intelligent systems in recognizing text in an image], *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova* [Bulletin of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov], 2022, No. 1 (61), pp. 46-52.
6. Borisov A.A., Vasil'ev Yu.A., Vladzimirskiy A.V., Omelyanskaya O.V., Semenov S.S., Arzamasov K.M. Ispol'zovanie neyronnykh setey dlya poiska narusheniy ukladki patsienta na rentgenogramмах organov grudnoy kletki [Using neural networks to search for patient positioning disorders on chest X-rays], *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya* [Software systems: theory and applications], 2023, Vol. 14, No. 3 (58), pp. 95-113.
7. Akutin A.S., Goryakin M.V., Zubavlenko R.A., Pechenkin V.V., Solopekin D.A. Ispol'zovanie iskusstvennykh neyronnykh setey dlya vypolneniya segmentatsii rentgenogramm tazobedrennogo sustava pri lechenii osteoartrita [Using artificial neural networks to perform segmentation of hip joint radiographs in the treatment of osteoarthritis], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology], 2024, Vol. 12, No. 1 (44). Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1486> (accessed 12 September 2024).

8. Doroshkin N.V., Obratsov V.A. Raspoznavanie obrazov na meditsinskikh izobrazheniyakh s pomoshch'yu neyronnoy seti [Pattern recognition in medical images using a neural network], *Voprosy ustoychivogo razvitiya obshchestva* [Issues of sustainable development of society], 2022, No. 4, pp. 941-948.
9. Kakumani A.K., Sree L.P. BRB U-Net: Bottleneck Residual Blocks in U-Net for Light-Weight Semantic Segmentation, *International Journal of Computer Applications*, 2022, Vol. 184, No. 33, pp. 63-67.
10. Kovalev V.Yu., Shishkin A.G. Raspoznavanie stilya proizvedeniy zhivopisi po ikh izobrazheniyam s pomoshch'yu glubokikh neyronnykh setey [Recognition of the style of works of art from their images using deep neural networks], *Informatika i sistemy upravleniya* [Computer Science and Control Systems], 2020, No. 3 (65), pp. 74-86.
11. Filina O.S. Vozможности primeneniya komp'yuternykh graficheskikh prilozheniy v restavratsii i rekonstruktsii russkoy ikony [Possibilities of using computer graphics applications in the restoration and reconstruction of Russian icons], *Innovatsionnyy diskurs razvitiya sovremennoy nauki: Sb. statey V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovative discourse on the development of modern science: Collection of articles from the V International Scientific and Practical Conference]. Petrozavodsk, 2021, pp. 166-175.
12. Rassolova V.M., Pozdnyakova E.D., Lotoreva V.V. Issledovanie effektivnosti arkhitektur svertochnykh neyronnykh setey v reshenii zadachi klassifikatsii pri maloy obuchayushchey vyborke [Study of the efficiency of convolutional neural network architectures in solving the classification problem with a small training sample], *Auditorium*, 2023, No. 2 (38), pp. 73-81.
13. Buryy V.P., Borisova N.L. Raboty po restavratsii fragmentov drevnerusskikh stenopisey v MGKhPA im. S.G. Stroganova. Dekorativnoe iskusstvo i predmetno-prostranstvennaya sreda [Works on the restoration of fragments of ancient Russian murals at the Stroganov Moscow State Academy of Art and Industry. Decorative art and subject-spatial environment], *Vestnik RGKhPU im. S.G. Stroganova* [Bulletin of the Stroganov Russian State University of Art and Industry], 2019, No. 3-1, pp. 21-36.
14. Ivanov P.V., Tarasov A.V. Fotogrammetriya – novaya zhizn' staroy tekhnologii (printsipy i prilozhenie dlya poiskov MPI) [Photogrammetry - a new life for an old technology (principles and application for mineral exploration)], *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy blagorodnykh, tsvetnykh metallov i almazov: Sbornik tezisov dokladov VII nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific and methodological foundations for forecasting, prospecting and evaluating deposits of precious, non-ferrous metals and diamonds: Collection of abstracts of reports of the VII scientific and practical conference]. Moscow, 2017, pp. 118.
15. Khrishkevich G.A. Informatsionnye protsessy vosstanovleniya izobrazheniy monumental'noy zhivopisi [Information processes for restoring images of monumental painting], *Molodezh'-nauke: Mater. molodezhnykh nauchno-prakticheskikh konferentsiy Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta po itogam nauchno-issledovatel'skoy raboty v 2021/2022 uchebnom godu* [Youth for Science: Proceedings of youth scientific and practical conferences of Pskov State University based on the results of research work in the 2021/2022 academic year]. Pskov, 2022, Vol. I, pp. 134-137.
16. Hao X., Yin L., Li X. et al. A Multi-Objective Semantic Segmentation Algorithm Based on Improved U-Net Networks, *Remote Sensing*, 2023, 15 (7), 1838.
17. Li M., Liu X., Zhang A. et al. Testing of the stochastic parallel gradient descent algorithm to the alignment of a two-mirror telescope, *Journal of Optical Technology*, 2020, 87 (5), pp. 276-283
18. Mallaev A.R., Juraev F.D., Ochilov M.A. Improvement of control models of closed systems using neural networks, *Innovatsion texnologiyalar*, 2023, No. 3, pp. 17-26.
19. Proskuryakov N.E., Yakovlev B.S., Arkhangel'skaya N.N. Opredelenie parametrov, vliyayushchikh na vremya rascheta srednego tsveta izobrazheniya [Determination of parameters affecting the time of calculating the average color of an image], *Problemy mashinovedeniya: Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Problems of Mechanical Engineering: Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference]. Omsk, 2019, Part II, pp. 342-350.
20. Zotkina A.A., Kholkina V.M. Raspoznavanie izobrazheniy s pomoshch'yu svertochnykh neyronnykh setey [Image recognition using convolutional neural networks], *Sovremennye informatsionnye tekhnologii* [Modern information technologies], 2023, No. 38 (38), pp. 60-63.

Хришкевич Георгий Андреевич – Псковский государственный университет; e-mail: georggalileo21@mail.ru; г. Псков, Россия; тел.: 89212153944; Отделение информационно-коммуникационных технологий, образовательный департамент, Передовая инженерная школа гибридных технологий в станкостроении Союзного государства; инженер-исследователь; ассистент; аспирант.

Khrishkevich Georgy Andreevich – Pskov state university; e-mail: georggalileo21@mail.ru; Pskov, Russia; phone: +79212153944; Department of information and communication technologies, educational department, Advanced engineering school of hybrid technologies in the machine tool industry of the Union state; research engineer; assistant; postgraduate student.

Андреев Дмитрий Анатольевич – e-mail: d.andreev@pskgu.ru; Отделение информационно-коммуникационных технологий, образовательный департамент, Передовая инженерная школа гибридных технологий в станкостроении Союзного государства; к.т.н.; доцент.

Andreev Dmitry Anatolyevich – e-mail: d.andreev@pskgu.ru; Department of information and communication technologies, educational department, Advanced engineering school of hybrid technologies in the machine tool industry of the Union state; cand. of eng. sc.; associate professor.

Мотайленко Лилия Владимировна – e-mail: l.motailenko@pskgu.ru; Отделение информационно-коммуникационных технологий, образовательный департамент, Передовая инженерная школа гибридных технологий в станкостроении Союзного государства; к.т.н.; доцент.

Motaylenko Lilia Vladimirovna – e-mail: l.motailenko@pskgu.ru; Department of information and communication technologies, educational department, Advanced engineering school of hybrid technologies in the machine tool industry of the Union state; cand. of eng. sc.; associate professor.

Бруттан Юлия Викторовна – e-mail: bruttan@pskgu.ru; Отделение информационно-коммуникационных технологий, образовательный департамент, Передовая инженерная школа гибридных технологий в станкостроении Союзного государства; к.т.н.; доцент.

Bruttan Iuliia Victorovna – e-mail: bruttan@pskgu.ru; Department of information and communication technologies, educational department, Advanced engineering school of hybrid technologies in the machine tool industry of the Union state; cand. of eng. sc.; associate professor.

Тимофеева Ольга Николаевна – e-mail: on.timofeeva@pskgu.ru; Отделение информационно-коммуникационных технологий, образовательный департамент, Передовая инженерная школа гибридных технологий в станкостроении Союзного государства; старший преподаватель.

Timofeeva Olga Nikolaevna – e-mail: on.timofeeva@pskgu.ru; Department of information and communication technologies, educational department, Advanced engineering school of hybrid technologies in the machine tool industry of the Union state; senior lecturer.

УДК 621.396.677

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-76-85

К.М. Занин

АЛГОРИТМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОФИЛИРОВАННОГО РЕФЛЕКТОРА ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При построении комплексов спутниковой связи, размещаемых на борту спутников-ретрансляторов, требуется обеспечение заданного ее качества в пределах установленной зоны обслуживания на поверхности Земли. Рабочая область в таких задачах может иметь сложную форму границы. Для покрытия заданной территории применяют бортовые антенные системы (АС), которые реализуют контурную диаграмму направленности (ДН), так как качество связи напрямую связано с параметрами главного лепестка ДН. Формируемая ДН должна учитывать данный фактор, и, как следствие, главный ее лепесток должен быть максимально приближен по форме к контуру границы обслуживаемой территории. Одним из возможных вариантов построения АС с контурной ДН является использование зеркальной антенны (ЗА) с одиночным облучателем и рефлектором с профилированной поверхностью, закон профилирования которой определяется формой границы обслуживаемой территории. Необходимость моделирования и анализа ожидаемых параметров ДН таких антенн требует представления профилированного рефлектора в виде объемной модели, которая используется в качестве исходных данных для пакетов электродинамического моделирования. Построение объемной модели заключается в представлении результатов решения уравнения, описывающего форму рефлектора, в поверхность без разрывов, на которой могут быть заданы граничные условия в используемых программных пакетах. Проведенный анализ информации, доступной из открытых источников, показал, что в литературе недостаточно подробно рассмотрены вопросы синтеза объемных фигур с учетом особенностей проектирования ЗА. Целью работы являлось построение объемной модели профилированного рефлектора в задачах электродинамического моделирования с учетом особенностей построения ЗА. Для достижения поставленной цели решена задача разработки соответствующего алгоритма. В ходе проведенных исследований разработан алгоритм представления профилированного реф-

лектора ЗА, позволяющий построить соответствующую объемную модель, которая может быть использована в задачах электродинамического моделирования. Представленный алгоритм преобразует результаты решения уравнения, содержащего информацию о форме рефлектора, в поверхность без разрывов, на которой могут быть заданы граничные условия.

Объемная модель; зеркальная антенна; профилированный рефлектор.

К.М. Zanin

AN ALGORITHM FOR FORMING A PROFILED REFLECTOR OF A REFLECTOR ANTENNA IN PROBLEMS OF ELECTRODYNAMIC MODELING

When design satellite communication complexes that are placed on board space satellites, it is required to ensure a given communication quality within the established service area. The workspace in such tasks can have a complex border shape. To cover a given area, on-board antenna systems are used, which implement a contour pattern. The quality of communication is directly related to the parameters of the main lobe of the directional pattern. The directional pattern should take this factor into account, and the main lobe should be as close in shape as possible to the contour of the border of the serviced area. One of the possible options for design an antenna system with a contour pattern is the use of a reflector antenna. The antenna has a single source and a reflector with a profiled surface. The law of profiling the reflector surface is determined by the shape of the boundary of the serviced area. At the antenna design stage, it becomes necessary to model and analyze the parameters of the radiation pattern. This requires a 3D model of a profiled reflector. This 3D model is used as input data for electrodynamic modeling programs. The construction of a 3D model consists of solving the equation that describes the reflector and forming the results of solving the equation in the form of a solid. The analysis of the published articles showed that currently the issues of forming 3D models, taking into account the design features of reflector antennas, are not considered in sufficient detail. The goal of the work was to build a 3D model of a profiled reflector for electrodynamic modeling, taking into account the features of the construction of reflector antennas. To achieve this goal, the task of developing an appropriate algorithm has been solved. In the course of the conducted research, an algorithm for forming a profiled reflector has been developed, which allows creating an appropriate 3D model that can be used in electrodynamic modeling tasks. The developed algorithm converts the results of solving an equation containing information about the shape of the reflector into a discontinuous surface on which boundary conditions can be set.

3d model; reflector antenna; profiled reflector.

Введение. При построении комплексов спутниковой связи, размещаемых на борту спутников-ретрансляторов, требуется обеспечение заданного ее качества в пределах установленной зоны обслуживания на поверхности Земли. Рабочая области в таких задачах может иметь сложную форму, которая не описывается простыми геометрическими фигурами, с границей в виде окружности или эллипса. Для покрытия заданной территории применяют бортовые антенные системы (АС) космических аппаратов, которые реализуют контурную диаграмму направленности (ДН) [1–7], так как качество связи напрямую связано с параметрами главного лепестка ДН. Снижение уровня ДН в пределах рабочей области приводит к уменьшению скорости передачи информации или к полному отсутствию возможности установки соединения между абонентами. В свою очередь излучение бортовой антенны за пределы установленной зоны обслуживания, с учетом коммерческого характера услуг связи, влечет за собой трату ресурсов радиоканала на неучтенный трафик. Формируемая ДН должна учитывать данные факторы, и, как следствие, главный ее лепесток должен быть максимально приближен по форме к контуру границы обслуживаемой территории.

Одним из возможных вариантов построения АС с контурной ДН является использование зеркальной антенны (ЗА) с одиночным облучателем и рефлектором с профилированной поверхностью, закон профилирования которой определяется формой границы обслуживаемой территории [8–15].

Необходимость моделирования и анализа ожидаемых параметров диаграммы направленности (ДН) ЗА при проектировании требует представления профилированного рефлектора в виде объемной модели, которая используется в качестве исходных данных для пакетов электродинамического моделирования, таких как «САПР GAMMA», «FEKO», «ANSYS HFSS», «CST Studio Suite» и др.

Данная объемная модель строится на основе результата синтеза ЗА, которым является уравнение поверхности рефлектора. Построение объемной модели заключается в представлении результатов решения уравнения в виде поверхности без разрывов, на которой могут быть заданы граничные условия в используемых программных пакетах.

В современной литературе описано множество способов синтеза объемной фигуры, например «blender python api», «Vpython», «OpenGL» и др. Однако данные подходы не учитывают особенностей проектирования ЗА. К таким особенностям можно отнести необходимость наиболее точного повторения заданной формы рефлектора, которая определяет распределение фаз (ФР) на апертуре ЗА и, как следствие, параметры ДН [16, 17]. Также необходимо учитывать значения дифракционных потерь, которые возникают вследствие дифракции электромагнитного поля на острых гранях рефлектора.

Проведенный анализ информации, доступной из открытых источников, показывает, что в литературе недостаточно подробно рассмотрены данные вопросы.

Целью работы является построение объемной модели профилированного рефлектора в задачах электродинамического моделирования с учетом особенностей построения ЗА.

Для достижения поставленной цели решается задача разработки соответствующего алгоритма.

Алгоритм представления профилированного рефлектора ЗА. Для представления профилированного рефлектора установлены следующие исходные данные:

- ◆ определена Декартова система координат, связанная с рефлектором ЗА, у которой ось z направлена в сторону его геометрической оси;
- ◆ использовано известное уравнение $z = f(x, y)$, описывающее поверхность рефлектора;
- ◆ задана длина волны λ на средней рабочей частоте.

Построение объемной модели профилированного рефлектора выполнено численными методами. Поэтому на первом шаге сформирована координатная сетка (x, y) с числом строк N и столбцов M . Определены номера строк $n \in [0, N - 1]$ и номера столбцов $m \in [0, M - 1]$. В задачах электродинамического моделирования шаг координатной сетки d по строкам и столбцам в значительной степени определяет сложность объемной фигуры и, как следствие, требования к объему вычислительных ресурсов. Поэтому значение d необходимо выбирать как можно большим. С другой стороны, шаг сетки d , определяющий точность формирования поверхности, зависит в АС от рабочего сектора углов $\Delta\theta$

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin(\Delta\theta)}.$$

Формула определяет условие отсутствия дифракционных максимумов в рабочем секторе углов. Поэтому значение d выбирается, исходя из компромисса между данными условиями, и может составлять от $\lambda/4$ до $\lambda/2$ в общем случае.

При задании координатной сетки необходимо учитывать возможность замощения синтезируемой поверхности без пропусков. Для этого могут быть использованы правильные треугольники или шестиугольники. В данном исследовании поверхность рефлектора разделена на шестиугольники, а координатная сетка в соответствии с этим задана формулами:

$$\begin{aligned} x_{n,m} &= d \cdot m - \frac{d \cdot (M - 1)}{2} + (-1)^n \cdot \frac{d}{4}, \\ y_n &= -d \cdot n + \frac{d \cdot (N - 1)}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

С учетом (1) координаты узлов поверхности рефлектора имеют вид: $x_{n,m}$, y_n , $z_{n,m} = f(x_{n,m}, y_n)$. Пример возможного варианта координатной сетки и взаимного положения узлов поверхности приведен на рис. 1 и 2 соответственно.

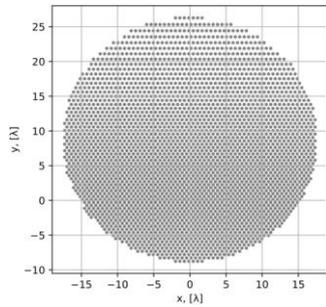


Рис. 1. Координатная сетка

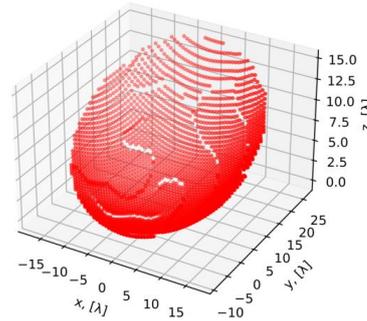


Рис. 2. Узлы поверхности рефлектора

Для замощения полученной фигуры шестиугольниками необходимо определить координаты их вершин. В заданной системе координат положение вершин шестиугольников можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} x^{(i)}_{n,m} &= x_{n,m} + R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} \cdot i\right), \\ y^{(i)}_n &= y_n + R \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot i\right), \\ z^{(i)}_{n,m} &= f(x^{(i)}_{n,m}, y^{(i)}_n), \end{aligned} \quad (2)$$

где $R = \frac{d}{2 \cdot \cos(\frac{\pi}{6})}$ – радиус окружности, описанной вокруг шестиугольника, $i \in [0, 5]$ – номер вершины шестиугольника. Результаты вычислений с помощью (2) и форма полученной поверхности рефлектора, состоящей из шестиугольников, приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Поверхность рефлектора на рис. 4 приводится для контроля промежуточного результата вычислений, вопросы же ее построения будут рассмотрены далее.

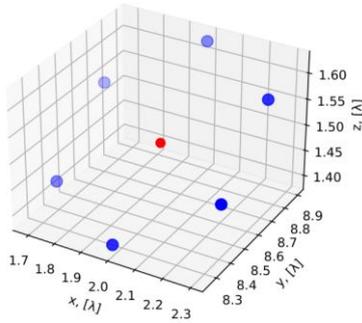


Рис. 3. Вершины шестиугольника



Рис. 4. Поверхность рефлектора, состоящая из шестиугольников

Полученная поверхность рефлектора не является замкнутой, что обуславливается заданным уравнением $z = f(x, y)$. Следовательно, результат электродинамического моделирования такой ЗА будет некорректным. Для устранения данного недостатка предлагается дополнить поверхности каждого из шестиугольников до объемных фигур (элементов рефлектора), что позволит построить замкнутую поверхность, на которой могут быть заданы граничные условия.

Пусть обратную поверхность таких элементов описывает уравнение $z = f'(x, y)$, которое является более простым в сравнении с $z = f(x, y)$, а также выполняется неравенство

$$z^{(i)}_{n,m} \geq f'(x^{(i)}_{n,m}, y^{(i)}_n) + h, \quad (3)$$

где h – минимальная толщина рефлектора.

Результаты вычислений с помощью (2) и (3) приведены на рис. 5. Объемная модель рефлектора, состоящая из объемных фигур, показана на рис. 6.

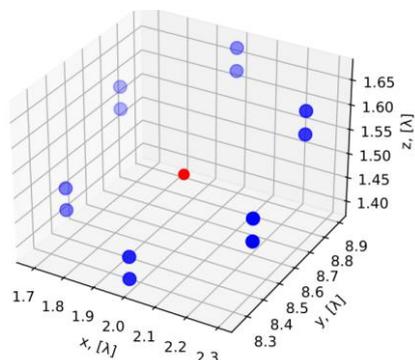


Рис. 5. Вершины объемного элемента рефлектора



Рис. 6. Поверхность рефлектора, состоящая из объемных фигур

Рабочая поверхность построенной объемной фигуры соответствует поверхности рефлектора, показанной на рис. 4, а также является замкнутой, и на ней могут быть заданы граничные условия. Синтезированная объемная модель может использоваться в задачах электродинамического моделирования в качестве исходных данных. Однако совокупность большого количества криволинейных поверхностей, полученных согласно уравнениям $z = f(x, y)$ и $z = f'(x, y)$, сложна в машинной обработке при электродинамическом моделировании и сложна в производстве. Также большое количество острых граней способствует росту дифракционных потерь, которые возникают вследствие дифракции электромагнитного поля.

Для устранения указанных недостатков принято решение объединить некоторые вершины шестиугольников следующим образом. Поверхность каждого шестиугольника разделена на локально плоские участки путем замощения треугольниками. Такая поверхность имеет больше степеней свободы для редактирования в сравнении с аналитической поверхностью в общем случае.

Грани, показанные на рис. 6, имеют малое распределение высот дислокаций для большинства элементов рефлектора и порядка $4\lambda/10$ для элементов, в окрестности которых ФР на апертуре изменяется на значение, близкое к 360 градусов. В работах [18–20] проведен анализ влияния геометрических искажений раскрытия АС на параметры ДН, и показано, что искажения, не превышающие $\pm\lambda/24$, не оказывают существенного влияния на параметры ДН. С учетом этого выбран порог, при превышении которого относительная дислокация элементов сохраняется, а в противоположном случае выполняется объединение вершин образующих его шестиугольников путем приравнивания их координаты $z^{(i)}$ среднему арифметическому с соседними вершинами. Примеры элементов рефлектора с разделенными и объединенными вершинами приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

Для построения объемных моделей элементов рефлектора, показанных на рис. 7, 8, необходимо описать поверхности каждого из них определенным образом. Результат описания должен восприниматься программами электродинамического моделирования как твердое тело. Подобным свойством обладают объемные модели, описанные с помощью форматов «*.step», «*.iges», «*.stl», «*.obj» и др. В данной работе использован формат «*.stl», так как он имеет упрощенную структуру и может быть сформирован с помощью большинства языков программирования, у которых реализована возможность работы со строковыми переменными. Элемент структуры файла «*.stl» имеет вид:

```

facet normal 0 0 0
  outer loop
    vertex - x1 y1 z1
    vertex - x2 y2 z2
    vertex - x3 y3 z3
  endloop
endfacet,

```

где $x_1 y_1 z_1$; $x_2 y_2 z_2$; $x_3 y_3 z_3$ – координаты вершин треугольников, образующих поверхности элемента рефлектора. На рабочей и обратной стороне элемента рефлектора таких треугольников выделено по шесть. Внутри группы из шести треугольников каждый из них имеет общую вершину с координатами $x_{n,m}$, y_n , $z_{n,m} = f(x_{n,m}, y_n)$ и $x_{n,m}$, y_n , $z'_{n,m} = f'(x_{n,m}, y_n)$ для рабочей и обратной поверхностей рефлектора соответственно (см. рис. 7, 8). Сопрягающиеся грани элементов рефлектора представляют собой четырехугольники, где каждый из них разделен на два треугольника, координаты вершин которых вычислены ранее. Таким образом, каждый элемент рефлектора описывается совокупностью из двадцати четырех треугольников, заданных с помощью известной структуры «*.stl» файла.

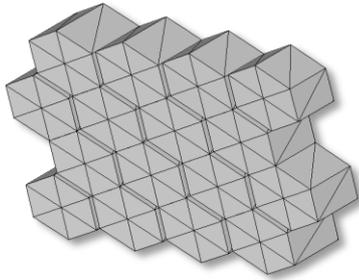


Рис. 7. Элементы рефлектора с разделенными вершинами

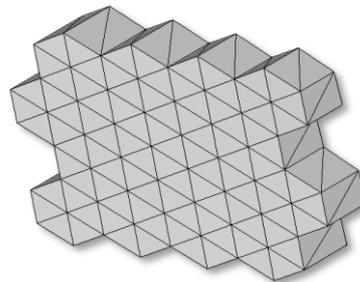


Рис. 8. Элементы рефлектора с объединенными вершинами

Применяя данный подход ко всем элементам рефлектора, получена его объемная модель, которая показана на рис. 9.

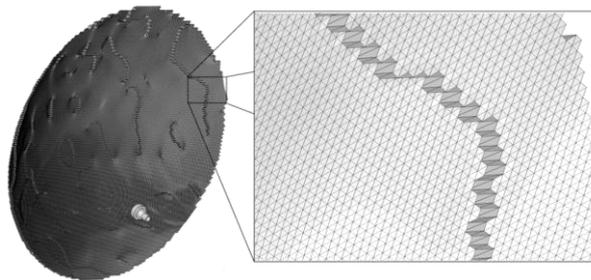


Рис. 9. Объемная модель ЗА со сглаженным рефлектором

Объемная модель ЗА, показанная на рис. 9, имеет на 93% меньшую площадь дислокаций элементов рефлектора по сравнению с исходной фигурой. Полное устранение дислокаций элементов рефлектора приводит к существенному искажению требуемого ФР и, соответственно, к ухудшению параметров ДН. Также на поверхности данной модели могут быть заданы граничные условия, и путем электродинамического моделирования рассчитаны параметры ДН.

Описанную последовательность действий можно обобщить блок-схемой, приведенной на рис. 10.

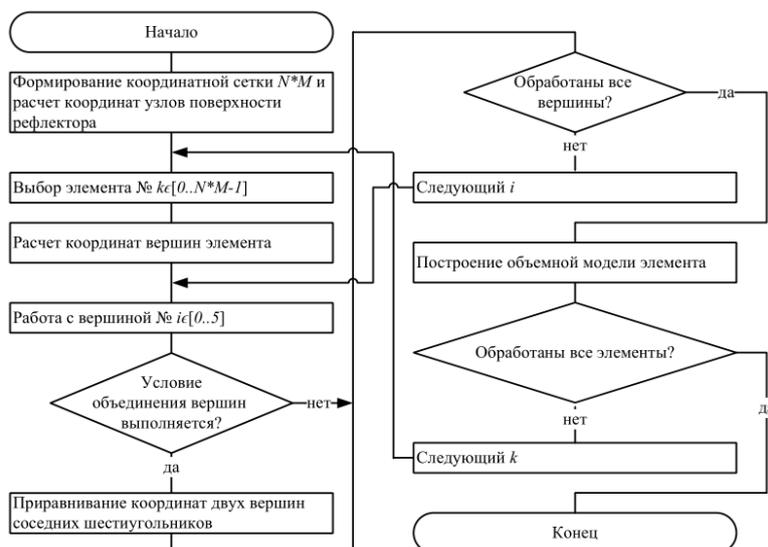


Рис. 10. Блок-схема алгоритма представления профилированного рефлектора

В работе [21] проведена верификация данного алгоритма. В ней для ЗА методами электродинамического моделирования рассчитана ДН. Результаты расчетов показали, что ожидаемые параметры ДН и параметры ДН, полученные при моделировании, не имеют значительных отличий ни в части коэффициента направленного действия, ни в части формы сечения главного лепестка.

Выводы. Исследованный алгоритм представления профилированного рефлектора ЗА позволяет построить соответствующую объемную модель, которая может быть использована в задачах электродинамического моделирования в качестве исходных данных. Алгоритм учитывает особенности построения ЗА и состоит из следующих основных шагов:

- ◆ формирование координатной сетки, в соответствии с которой будут расположены элементы рефлектора ЗА;
- ◆ расчет координат вершин элементов рефлектора;
- ◆ уменьшение площади взаимной дислокации элементов путем объединения близко расположенных вершин;
- ◆ формирование файла, содержащего информацию о совокупности поверхностей, образующих элементы рефлектора ЗА.

Представленный алгоритм преобразует результаты решения уравнения, содержащего информацию о форме рефлектора, в поверхность без разрывов, на которой могут быть заданы граничные условия в используемых программных пакетах электродинамического моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Florencio R., Encinar J.A., Boix R.R., Losada V., and Toso G. Reflectarray antennas for dual polarization and broadband telecom satellite applications // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2015. – Vol. 63, No. 4. – P. 1234-1246. – DOI: 10.1109/TAP.2015.2391279.
2. Daniel R. Prado, Manuel Arrebola, Marcos R. Pino, George Goussetis. Contoured-Beam Dual-Band Dual-Linear Polarized Reflectarray Design Using a Multiobjective Multistage Optimization // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2020. – Vol. 11, No. 68. – P. 7682-7687. – DOI: 10.1109/TAP.2020.2993014.
3. Капошин В.А., Фролова Е.В. Синтез трехзеркальной системы с заданной формой главного зеркала по фазовому фронту и закону отображения // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 9. – С. 887-890. – DOI:10.1134/S0033849419080072.

4. JiXiang Wan, Tao Yan, Feng Wang. A Hybrid Reflector Antenna for Two Contoured Beams With Different Shapes // *IEEE Antennas and wireless propagation letters*. – 2018. – Vol. 17, No. 7. – P. 1171-1175. – DOI: 10.1109/LAWP.2018.2836927.
5. Zhenqin Zheng, Long Zhang, Xianting Xie, Qingwei Ji, Hui Chen, Chunxu Mao. Single-Feed Reflectarray Antenna with Eight Beams for Satellite Communications // *IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology*. – 2021. – P. 658-661. – DOI: 10.1109/ICEICT53123.2021.9531087.
6. Мануилов Б.Д., Баишы П.Н., Безуглов Ю.Д. Алгоритм управления многофункциональными антенными решетками на основе метода парциальных диаграмм // *Антенны*. – 2005. – № 9. – С. 72-81.
7. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн. – М.: Советское радио, 1980. – 295 с.
8. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1985. – 336 с.
9. Узолин Е.Ю., Крюков И.Г. Синтез профиля поверхности рефлекторов однозеркальных контурных антенн с использованием полиномов Цернике // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2012. – № 3. – С. 92-95.
10. Банков С.Е., Калошин В.А., Фролова Е.А. Оптимизация планарных зеркальных систем по совокупности показателей качества // *Радиотехника и электроника*. – 2014. – Т. 59, № 11. – С. 1090-1101. – DOI: 10.7868/S0033849414100027.
11. Калошин В.А., Попов А.П. О синтезе двухзеркальных антенн по амплитудной диаграмме направленности // *Радиотехника и электроника*. – 1982. – № 6. – С. 1110-1119.
12. Rafael A. Penchel, José R. Bergmann, Fernando J. S. Moreira. Shaping Single Offset Reflector Antennas Using Local Axis-Displaced Confocal Quadrics // *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation*. – 2016. – P. 1-9. – DOI: 10.1155/2016/4715681.
13. Semenov B.V., Chernykh N.I., Pleshchev V.M. New method of reflector surface shaping to produce a prescribed contour beam // *Ural mathematical journal*. – 2017. – Vol. 3, No. 2. – P. 143-151. – DOI: 10.15826/umj.2017.2.015.
14. Poulton G.T., Hay S.G. Shaped reflector synthesis by successive projections // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. – 1992 Digest. – P. 363-366. – DOI: 10.1109/APS.1992.221924.
15. Шишлов А.В. Зеркальные антенны с контурными диаграммами направленности – эффективность и предельные возможности // *Радиотехника*. – 2006. – № 4. – С. 45-50.
16. Мищенко Е.Н., Мищенко С.Е. Рекуррентный алгоритм вычисления радиальных функций полиномов Цернике // *Вестник РГУПС*. – 2017. – № 1. – С. 121-127.
17. Безуглов Д.А., Забродин Р.А. Методика аппроксимации гибкого адаптивного зеркала ограниченным числом полиномов Цернике // *Оптика атмосферы и океана*. – 2006. – Т. 19, № 9. – С. 810-814.
18. Венецкий А.С., Калошин В.А. Фазовое, лучевое и амплитудное распределение поля в осесимметричной двухзеркальной телескопической системе при смещении облучателя из фокуса // *Доклады VI Всеросс. конф. «Радиолокация и радиосвязь»*. – М., 2012. – Т. 2. – С. 250-254.
19. Габриэлян Д.Д., Занин К.М., Федоров Д.С. Математическая модель излучающего раскрыва фазированной антенной решетки при наличии погрешностей установки антенных элементов // *Антенны*. – 2023. – № 2. – С. 52-58. – DOI: <https://doi.org/10.18127/j03209601-202302-06>.
20. Занин К.М. Математическая модель излучающего раскрыва фазированной антенной решетки, имеющей геометрические искажения апертуры // *Сб. трудов XXIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2023)*. – Т.4. – С. 93-102.
21. Занин К.М., Габриэлян Д.Д., Кузнецов Ю.В., Мищенко С.Е. Профилирование рефлектора зеркальной антенны для формирования заданного контура главного лепестка диаграммы направленности // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 4. – С. 169-181. – <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-4-169-181>.

REFERENCES

1. Florencio R., Encinar J.A., Boix R.R., Losada V., and Toso G. Reflectarray antennas for dual polarization and broadband telecom satellite applications, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2015, Vol. 63, No. 4, pp. 1234-1246. DOI: 10.1109/TAP.2015.2391279.
2. Daniel R. Prado, Manuel Arrebola, Marcos R. Pino, George Goussetis. Contoured-Beam Dual-Band Dual-Linear Polarized Reflectarray Design Using a Multiobjective Multistage Optimization, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2020, Vol. 11, No. 68, pp. 7682-7687. DOI: 10.1109/TAP.2020.2993014.
3. Kaloshin V.A., Frolova E.V. Sintez trekhzernkal'noy sistemy s zadannoy formoy glavnogo zerkala po fazovomu frontu i zakonu otobrazheniya [Synthesis of a three-mirror system with a given shape of the main mirror along the phase front and the law of mapping], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2019, Vol. 64, No. 9, pp. 887-890. DOI: 10.1134/S0033849419080072.

4. JiXiang Wan, Tao Yan, Feng Wang. A Hybrid Reflector Antenna for Two Contoured Beams With Different Shapes, *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2018, Vol. 17, No. 7, pp 1171-1175. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2836927.
5. Zhenqin Zheng, Long Zhang, Xianting Xie, Qingwei Ji, Hui Chen, Chunxu Mao. Single-Feed Reflectarray Antenna with Eight Beams for Satellite Communications, *IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology*, 2021, pp. 658-661. DOI: 10.1109/ICEICT53123.2021.9531087.
6. Manuilov B.D. Bashly P.N. Bezuglov Yu.D. Algoritm upravleniya mnogofunktional'nymi antennymi reshetkami na osnove metoda partial'nykh diagramm [Algorithm for controlling multifunctional antenna arrays based on the method of partial diagrams], *Antenny* [Antennas], 2005, No. 9, pp. 72-81.
7. Zelkin E.G., Sokolov V.G. Metody sinteza antenn [Methods of antenna synthesis]. Moscow: Sovetskoe radio, 1980, 295 p.
8. Vorontsov M.A., Shmal'gauzen V.I. Printsipy adaptivnoy optiki [Principles of adaptive optics]. Moscow: Nauka, 1985, 336 p.
9. Uzolin E.Yu., Kryukov I.G. Sintez profilya poverkhnosti reflektorov odnozerkal'nykh konturnykh antenn s ispol'zovaniem polinomov Tsernike [Synthesis of the surface profile of reflectors of single-mirror contour antennas using Zernike polynomials], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2012, No. 3, pp. 92-95.
10. Bankov S.E., Kaloshin V.A., Frolova E.A. Optimizatsiya planarnykh zerkal'nykh sistem po sovokupnosti pokazateley kachestva [Optimization of planar reflector systems for a set of quality indices], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2014, Vol. 59, No. 11, pp. 1090-1101. DOI: 10.7868/S0033849414100027.
11. Kaloshin V.A., Popov A.P. O sinteze dvukhzerkal'nykh antenn po amplitudnoy diagramme napravlenosti [On the synthesis of two-mirror antennas based on the amplitude radiation pattern], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 1982, No. 6, pp.1110-1119.
12. Rafael A. Penchel, José R. Bergmann, Fernando J. S. Moreira. Shaping Single Offset Reflector Antennas Using Local Axis-Displaced Confocal Quadrics, *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation*, 2016, pp. 1-9. DOI: 10.1155/2016/4715681.
13. Semenov B.V., Chernykh N.I., Pleshchev V.M. New method of reflector surface shaping to produce a prescribed contour beam, *Ural mathematical journal*, 2017, Vol. 3, No. 2, p. 143-151. DOI: 10.15826/umj.2017.2.015.
14. Poulton G.T., Hay S.G. Shaped reflector synthesis by successive projections, *IEEE Antennas and propagation Society International Symposium*, 1992 Digest, pp. 363-366. DOI: 10.1109/APS.1992.221924.
15. Shishlov A.V. Zerkal'nye anteny s konturnymi diagrammami napravlenosti – effektivnost' i predel'nye vozmozhnosti [Reflector antennas with contoured beams: efficiency and limiting capability], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2006, No. 4, pp. 45-50.
16. Mishchenko E.N., Mishchenko S.E. Rekurrentnyy algoritm vychisleniya radial'nykh funktsiy polinomov Tsernike [Recurrent algorithm for calculation of the radial functions of Zernike polynomials], *Vestnik RGUPS* [Bulletin of the Rostov State University of Railways], 2017, No. 1, pp. 121-127.
17. Bezuglov D.A., Zabrodin R.A. Metodika approksimatsii gibkogo adaptivnogo zerkala ograniченным chislom polinomov Tsernike [Methodology for approximating a flexible adaptive mirror by a limited number of Zernike polynomials], *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the Atmosphere and Ocean], 2006, Vol. 19, No. 9, pp. 810-814.
18. Venetskiy A.S., Kaloshin V.A. Fazovoe, luchevoe i amplitudnoe raspredelenie polya v osesimmetrichnoy dvukhzerkal'noy teleskopicheskoy sisteme pri smeshchenii obluchatelya iz fokusa [Phase, radial and amplitude distribution of the field in an axisymmetric two-reflector telescopic system when the irradiator is displaced from focus], *Doklady VI Vseross. konf. «Radiolokatsiya i radiosvyaz'»* [Reports of the VI All-Russia conference “Radar and radio communication”]. Moscow, 2012, Vol. 2, pp. 250-254.
19. Gabriel'yan D.D., Zanin K.M., Fedorov D.S. Matematicheskaya model' izluchayushchego raskryva fazirovannoy antennoy reshetki pri nalichii pogreshnostey ustanovki antennoykh elementov [Mathematical model of phased array antenna aperture in the presence of errors in the position of antenna elements], *Antenny* [Antennas], 2023, No. 2, pp. 52-58. DOI: <https://doi.org/10.18127/j03209601-202302-06>.

20. *Zanin K.M.* Matematicheskaya model' izluchayushchego raskryva fazirovannoy antennoy reshetki, imeyushchey geometricheskie iskazheniya apertury [Mathematical model of the aperture field of a phased antenna array in the presence of geometric distortions of the aperture], *Sb. trudov XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'» (RLNC*2023)* [Reports of XXIX International Scientific Conference «Radiolocation, navigation, communication» (RLNC*2023)], 2023, Vol. 4, pp. 93-102.
21. *Zanin K.M., Gabriel'yan D.D., Kuznetsov Yu.V., Mishchenko S.E.* Profilirovanie reflektora zerkal'noy anteny dlya formirovaniya zadannogo kontura glavnogo lepestka diagrammy napravlenosti [Shaping of contoured-beam antenna main lobe by profiling of reflector antenna], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 4, pp. 169-181. Available at: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-4-169-181>.

Занин Константин Михайлович – ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»; e-mail: konstantinzanin@rambler.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 88632018463; аспирант; руководитель группы.

Zanin Konstantin Mikhailovich – FSUE “Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication”; e-mail: konstantinzanin@rambler.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632018463; postgraduate student, head of group.

УДК 004.8

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-85-96

Е.В. Лищенко, Э.В. Мельник, А.С. Матвиенко, А.Ю. Будко

МЕТОД ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНОЙ ГЕОПРИВЯЗКИ*

Рассмотрена проблема, связанная с определением текущих координат подвижного объекта в условиях нестабильного сигнала от глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Актуальность работы обусловлена тем, что в последние годы подвижные объекты находят все более широкое применение практически во всех отраслях промышленности, сельского хозяйства, на транспорте, решая разнообразные задачи наблюдения, разведки, мониторинга состояния контролируемых объектов, проведение поисково-спасательных операций, доставки грузов и много другое. При этом успешность выполнения заданий во многом зависит от того, насколько точно и эффективно работает его бортовая навигационная система в режиме реального времени. Существующие решения бортовых систем позиционирования предполагают использование инерциальных и глобальных навигационных спутниковых систем. Для первого типа характерно наличие эффекта дрейфа ввиду использования гироскопов и акселерометров. Для систем, использующих данные от ГСП сложности связаны с частичной или полной потерей сигнала. В настоящей работе описан метод сохранения заданной точности пространственного позиционирования подвижного объекта в условиях частичного или полного отсутствия данных от ГСП объекта. Данный метод основан на комбинации алгоритмов компьютерного зрения обработки кадров видеопотока от бортовой системы технического зрения (СТЗ) подвижного объекта, с целью обеспечения точности позиционирования в условиях частичного или полного отсутствия данных от спутниковых систем навигации. На основании передоложенного метода разработан алгоритм, предназначенный для автоматизированного определения координат подвижного объекта в условиях отсутствия данных привязки к карте местности от глобальных систем позиционирования (ГСП). Проведены эксперименты, которые подтвердили эффективность работы алгоритма в части сокращения временных затрат на описание и сопоставление ключевых точек и повышения точности сопоставления спутниковых снимков, которая является важным этапом задачи позиционирования подвижного объекта без использования данных глобальной геопривязки.

Компьютерное зрение; подвижный объект; бортовая подсистема позиционирования; система технического зрения; карта местности; искусственный интеллект; электронографическая карта местности.

* Исследование выполнено при поддержке гранта № 4Л/22-04-ПИШ.

E.V. Lishchenko, E.V. Melnik, A. S. Matvienko, A.Yu. Budko

METHOD OF MOVING OBJECT POSITIONING WITHOUT USING GLOBAL GEO-REFERENCED DATA

The paper considers the problem of determining the current coordinates of moving object in the conditions of unstable signal from the global navigation satellite system (GNSS). The relevance of the work is due to the fact that in recent years moving object are increasingly used in virtually all sectors of industry, agriculture, transportation, solving a variety of tasks of surveillance, reconnaissance, monitoring the state of controlled objects, search and rescue operations, cargo delivery and much more. At the same time, the success of flight missions largely depends on how accurately and efficiently its onboard navigation system works in real time. The existing solutions for creating onboard positioning systems involve the use of inertial and GNSS. However, they have the disadvantage of partial or complete absence of data from the GNSS (Global Positioning System). This paper describes a method for maintaining a given accuracy of moving object spatial positioning under conditions of partial or complete absence of data from the object's GSP. This approach is based on a combination of computer vision methods for processing video stream frames from the moving object on-board vision system (OVS) in order to ensure positioning accuracy under conditions of partial or complete absence of data from satellite navigation systems. Based on the advanced method, an algorithm has been developed for automated determination of moving object coordinates in the absence of georeferencing data from global positioning systems (GPS). Experiments have been carried out, which demonstrated the reduction of time costs for description and matching of key points and improvement of the accuracy of image matching. The developed algorithm was used to solve the problem of satellite image matching, which is an important step in the moving object positioning problem without the use of global geo-referencing data.

Computer vision; moving object; on-board positioning subsystem; vision system; terrain map; artificial intelligence; electronic terrain map.

Введение. Подвижные объекты, активно внедряемые в промышленности, сельском хозяйстве, транспорте и других сферах, выполняют широкий спектр задач: от наблюдения и разведки до доставки грузов и спасательных операций. Ключевым фактором успешности этих миссий является надежная и точная работа бортовой навигационной системы в режиме реального времени [1].

Система позиционирования подвижного объекта – это набор технологий и методов, которые позволяют определять географическое положение и движение ПО в режиме реального времени. Сегодня в мире существует множество систем, решающих задачи позиционирования:

- ◆ глобальные системы позиционирования;
- ◆ инерциальные системы позиционирования (ИСП);
- ◆ радиолокационные системы позиционирования;
- ◆ оптические системы позиционирования.

В настоящее время широко используют интегрированные системы позиционирования, сочетающие инерциальные системы позиционирования (ИСП) и глобальные системы позиционирования (ГСП), такие как GPS, GLONASS или Galileo. Эти системы предназначены для обеспечения высокой точности и надежности определения координат и скорости объекта. Однако такой подход имеет некоторые недостатки. Одним из основных ограничений является зависимость от сигналов ГСП, которые могут быть ослаблены или полностью отсутствовать в условиях плотной городской застройки и сложных метеорологических условиях [2].

Применение инерциальных систем позиционирования, работа которых основана на использовании гироскопов и акселерометров, также не решает проблему, поскольку таким системам свойственен эффект дрейфа, который накапливается во времени. Это означает, что точность позиционирования снижается с течением времени [3]. Частично нивелировать ошибки, связанные с дрейфом, возможно используя такие различные фильтры (комплементарный, Маджвика, Калмана и др.) [4]. Однако полностью решить проблему не представляется возможным.

При использовании оптических систем позиционирования важно иметь привязки объектов на изображении к их координатам. Спутниковые снимки обладают таким свойством, что делает целесообразным их использование в качестве основы для определения координат подвижного объекта. Для этого необходимо иметь возможность сопоставлять объект на снимках, получаемых с подвижного объекта, с объектом на спутниковых снимках. Для этого используется механизм выделения КТ.

В работе предложен метод сохранения заданной точности пространственного позиционирования подвижного объекта в условиях частичного или полного отсутствия данных от СГП объекта с использованием бортового оборудования без использования данных глобальной геопривязки. Данный метод заключается в использовании комбинации алгоритмов компьютерного зрения при сопоставлении спутниковых снимков с кадрами местности, полученными от СТЗ.

1. Сравнительный анализ алгоритмов выделения ключевых точек. Для определения наиболее эффективного алгоритмов выделения ключевых точек (КТ) была проведена серия экспериментов на различных наборах данных. Алгоритмы сравнивались по следующим критериям:

- ♦ устойчивость к различным искажениям на изображении: сохранение производительности при наличии шума;
- ♦ вычислительная сложность: время, необходимое для обнаружения точек.

Для обеспечения чистоты эксперимента и корректного сравнительного анализа производительности алгоритмов каждый из рассмотренных детекторов обрабатывал идентичный набор изображений. Применение единого тестового набора для всех алгоритмов позволило нивелировать влияние вариативности данных на результаты исследования и получить объективную оценку эффективности сравниваемых методов.

Эксперимент проводился на вычислительной платформе, включающей в себя процессор Intel Xeon E5-2666v3 с тактовой частотой 2.9 ГГц и 8 ГБ оперативной памяти DDR3 с частотой 2133МГц. Для ускорения вычислений использовалась видеокарта NVIDIA GeForce GTX 1650Ti в сочетании с технологией CUDA. Такая конфигурация обеспечивала достаточную вычислительную мощность для реализации алгоритмов компьютерного зрения и обработки больших объемов данных, необходимых для проведения эксперимента.

Набор данных для сравнительного анализа алгоритмов выделения ключевых точек [5–9] сформирован на основе изображений высокого разрешения с последующим применением различных преобразований для моделирования типичных искажений, встречающихся на практике. В данный набор входят 3 изображения без искажений с разрешениями 2048x2048, 1024x1024 и 512x512 пикселей (рис. 1).



Рис. 1. Изображения без искажений

Набор данных, помимо оригинальных изображений, включает в себя набор изображений с аугментацией, где под аугментацией понимаются различные типы искажений, такие как размытие, шум, изменение контрастности и яркости. Формирование такого набора обусловлено необходимостью учета как можно большего количества вариаций сцен и наличия на них различных визуальных искажений, с которыми алгоритмы выделения ключевых точек могут столкнуться на практике. Для оригинального изображения разрешением 512x512 сгенерированы дополнительные версии с применением следующих преобразований:

- ◆ размытие (Blur): к изображению применено размытие по Гауссу (рис. 2) с заданным значением ядра равным (15,15), имитирующее эффект расфокусировки;
- ◆ шум: для моделирования шума сенсора камеры или помех при передаче данных использован аддитивный Гауссовский шум (рис. 3) со средним значением (mean) 0 и дисперсией (var) 50;



Рис. 2. Изображение с размытием



Рис. 3. Изображение с шумом

- ◆ повышение контрастности достигнуто применением метода `cv2.convertScaleAbs()` с коэффициентом усиления контрастности (alpha) 1.5 и смещением яркости (beta) 50, что увеличивает разницу между светлыми и темными участками изображения (рис. 4,а);

- ◆ повышение яркости: яркость изображения повышена также с помощью `cv2.convertScaleAbs()` (рис. 4,б), но с коэффициентом усиления яркости (alpha) 2.0 и смещением яркости (beta) 30 для имитации переэкспонирования – состояния, когда на изображении теряются детали в светлых областях изображения из-за избытка света.



Рис. 4(а). Изображение с изменением контрастности



Рис. 4(б). Изображение с изменением яркости

Проведен сравнительный анализ работы алгоритмов на тестовом наборе данных. Результаты количества выделенных КТ и времени работы рассматриваемых алгоритмов представлены в табл. 1, 2 соответственно.

Таблица 1

Количество выделенных КТ

Алгоритм	Экс.1	Экс.2	Экс.3	Экс.4	Экс.5	Экс.6	Экс.7
FAST	0	2985	2405	15189	1265	34	235
SIFT	967	10318	9631	30576	6802	8338	7733
SURF	268	4532	4024	17189	2459	2290	1826
ORB	427	3285	3255	1307	2610	3311	2211
AKAZE	510	1602	1524	976	1095	5736	2736
KAZE	552	2355	2138	959	1432	4334	2560
KeyNet	7562	10000	10000	10000	1697	10000	4995

Таблица 2

Время выделения КТ

Алгоритм	Экс.1	Экс.2	Экс.3	Экс.4	Экс.5	Экс.6	Экс.7
FAST	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
SIFT	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.42	0.14
SURF	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02
ORB	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
AKAZE	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.31	0.12
KAZE	0.11	0.13	0.09	0.10	0.11	3.16	0.44
KeyNet	2.5	4.27	4.58	4.38	2.57	176.32	31.45
KeyNet (CUDA)	0.45	0.24	0.26	0.28	0.28	4.21	0.33

Для получения наиболее объективной оценки алгоритмов использовалась формула, которая учитывает как точность, так и время выделения характерных точек:

$$F = \left(\frac{N}{100}\right) \cdot 0,9 + \left(\frac{35-T}{35}\right) \cdot 0,1, \quad (1)$$

где N – среднее количество детектируемых ключевых точек, T – среднее время обработки.

В табл. 3 представлены результаты расчета коэффициента оценки для каждого алгоритма.

Таблица 3

F-score для детекторов ключевых точек

Алгоритм	Среднее количество точек	Среднее время работы (сек)	F
FAST	3159	0.0043	2.98
SIFT	10624	0.097	3.09
SURF	4655	0.017	3.00
ORB	2329	0.011	2.98
AKAZE	2026	0.073	2.97
KAZE	2047	0.591	2.91
KeyNet	7751	32.15	1.52
KeyNet (CUDA)	7751	0.836	3.04

FAST и ORB [10] отличаются высокой скоростью, но демонстрируют значительно меньшее количество детектируемых точек. Это может быть недостатком для задач с ограниченными вычислительными ресурсами, так как необходимо увеличить количество

обрабатываемых кадров, что может привести к недопустимым задержкам в работе системы. SURF предлагает хороший баланс между скоростью и точностью, демонстрируя высокую производительность и достаточное количество детектируемых точек, что делает его привлекательным вариантом для многих задач. AKAZE и KAZE демонстрируют средние результаты, не отличаясь ни в лучшую, ни в худшую сторону.

KeyNet, несмотря на большое количество выделяемых точек, требует значительных вычислительных ресурсов и эффективен только с использованием CUDA. Это делает его непригодным для бортовых систем с ограниченными ресурсами, за исключением случаев, когда в бортовых вычислителях есть доступ к распараллеливанию вычислений.

При выборе алгоритма для бортовых систем с ограниченными вычислительными ресурсами, таких как беспилотные летательные аппараты или роботизированные системы, SIFT предлагает более сбалансированный подход, учитывающий и точность, и скорость работы.

2. Сравнительный анализ алгоритмов описания и сопоставления КТ. Проведён анализ различных алгоритмов описания ключевых точек и методов их сопоставления [11–14] в условиях бортового применения с поддержкой распараллеливания вычислений CUDA при решении задач позиционирования подвижного объекта на основе обработки видеопотока от бортовой СТЗ.

В ходе экспериментов были рассмотрены нейросетевые методы описания такие как HardNet, HardNet8, HyNet, SOSNet [15], а также их альянс с AffNet. Для сравнительного анализа использовались алгоритмы сопоставления дескрипторов ключевых точек, полученных с помощью вышеперечисленных методов. В качестве таких алгоритмов были выбраны:

- ◆ KNN (K-Nearest Neighbors) — это алгоритм, который ищет k -ближайших соседей для каждого дескриптора в другом наборе дескрипторов. Сопоставление считается успешным, если два дескриптора являются взаимными ближайшими соседями [16].

- ◆ MNN (Mutual Nearest Neighbors) — модификация KNN, добавляя условие взаимного ближайшего соседства. То есть сопоставление считается успешным, только если два дескриптора являются взаимными k -ближайшими соседями [17].

- ◆ SNN (Second Nearest Neighbor) — алгоритм, который ищет два ближайших соседа для каждого дескриптора, а затем проверяет отношение расстояний между первым и вторым соседом. Соответствие считается успешным, если это отношение меньше заданного порога [18].

- ◆ AdaLAM (Adaptive Locally-Adaptive Matching) — это метод, который использует локальную адаптивную метрику для сравнения дескрипторов. Он учитывает контекст ключевых точек и адаптирует метрику для каждой точки, чтобы повысить точность сопоставления. AdaLAM эффективен для сопоставления изображений с большими изменениями освещения, шумом и деформацией [19, 20].

Эксперимент проводился на вычислительной платформе, включающей в себя процессор Intel Xeon E5-2666v3 с тактовой частотой 2.9 ГГц и 8 ГБ оперативной памяти DDR3 с частотой 2133 МГц. Для ускорения вычислений с использованием технологии CUDA использовалась видеокарта NVIDIA GeForce GTX 1650Ti. В качестве описываемых ключевых точек выступали точки, выделенные при помощи классического детектора SIFT. Тестовый набор данных, состоящий из трех пар изображений, представлен на рис. 5.

Сравнительный анализ работы различных алгоритмов, реализованных для описания и сопоставления точек КТ, проводился по двум ключевым показателям: среднему времени выполнения алгоритмов и среднему количеству сопоставленных ключевых точек на парах изображений. Результаты экспериментов представлены на рис. 6, 7.



Рис. 5. Тестовый набор данных

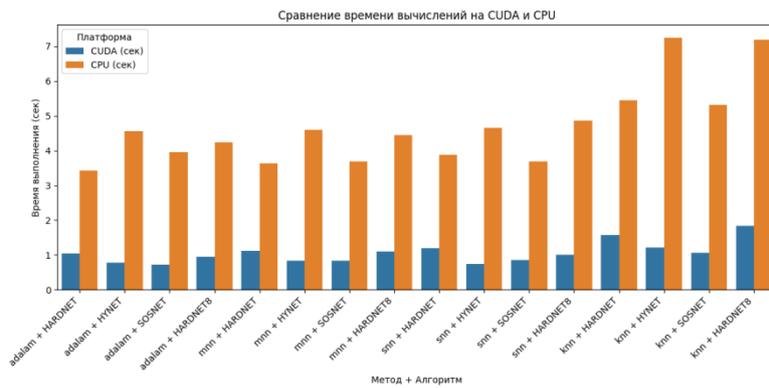


Рис. 6. Диаграмма временных затрат описания и сопоставления КТ

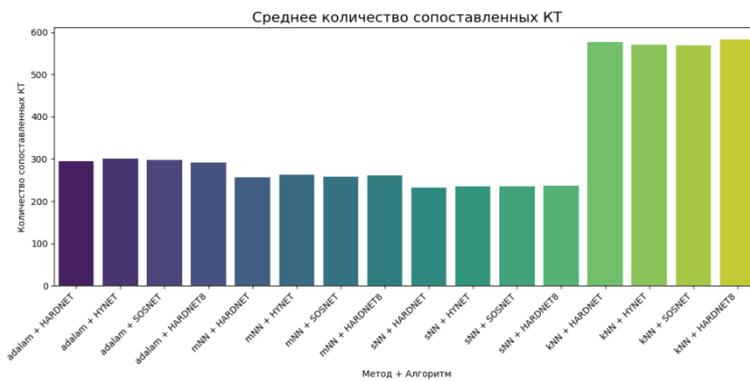


Рис. 7. Диаграмма среднего количества сопоставлений

Анализируя результаты экспериментов, можно сделать вывод о том, что наиболее подходящими для реализации бортовой подсистемы позиционирования подвижного объекта является совместное использование алгоритма описания ключевых точек SOSNet и

алгоритма сопоставления AdaLam. Такой выбор обусловлен тем, что алгоритм SOSNet демонстрирует наименьшее время выполнения среди рассмотренных вариантов, а алгоритм AdaLam обладает наилучшим соотношением точности и скорости работы. Также стоит отметить то, что использование бортовых вычислителей с поддержкой распараллеливания CUDA позволяет значительно ускорить процесс сопоставления ключевых точек на изображениях в среднем в 4.5 раза по сравнению с вычислением на центральных процессорах, что позволяет работать бортовой подсистеме позиционирования подвижного объекта в режиме реального времени.

3. Метод позиционирования подвижного объекта без использования данных глобальной геопривязки. На основании проведенного сравнительного анализа алгоритмов компьютерного зрения был разработан новый метод позиционирования подвижного объекта с использованием бортового оборудования без использования данных глобальной геопривязки. Данный метод заключается в использовании комбинации алгоритмов компьютерного зрения, в частности алгоритма SIFT для выделения КТ, алгоритма описания ключевых точек SOSNet и алгоритма сопоставления изображений AdaLam при сопоставлении спутниковых снимков с кадрами местности, полученными от СТЗ.

Решение задачи сопоставления спутниковых снимков представляет комплексный процесс, состоящий из нескольких этапов.

Первый этап разработка и реализация процедур предобработки глобальной привязки спутниковых снимков местности. Блок-схема предобработки фрагментов карты и их файлов привязки (рис. 8).



Рис. 8. Блок-схема предобработки карты местности

Далее необходимо решить задачу получения спутниковых снимков заданного масштаба по координатам, поступающих от системы навигации подвижного объекта. Функциональная блок-схема данного этапа представлена на рис. 9.

Для привязки к местности были использованы файлы с расширением ".kml", содержащие координаты углов фрагментов карты, что обеспечило высокую точность и надежность полученных данных. Пример содержания файла изображен на рис. 10.

На третьем этапе необходимо реализовать алгоритм выделения и описания ключевых точек при помощи методов, обеспечивающих инвариантность системы к углу поворота входных изображений относительно поверхности земли, а также устойчивости к различным искажениям качества изображений. Результат работы данного этапа представлен на рис. 11.



Рис. 9. Блок-схема алгоритма работы системы

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml><GroundOverlay><name>Tiles_1-1.jpg</name><color>88ffffff</color><Icon>
<href>Tiles_1-1.jpg</href>
<viewBoundScale>0.75</viewBoundScale></Icon><LatLonBox>
<north>47.2089172012345</north>
<south>47.2075852314001</south>
<east>38.9277148246765</east>
<west>38.9244049787521</west>
</LatLonBox></GroundOverlay></kml>
    
```

Рис. 10. Файл привязки

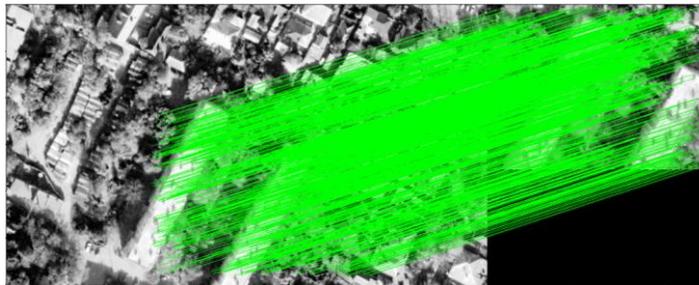


Рис. 11. Результат сопоставления КТ

Следующий этап заключался в увеличении точности определения координат подвижного объекта путем фильтрации ключевых точек сопоставленных изображений. Результат работы данного фильтра представлен в рис. 12. На данном рисунке слева изображены все сопоставленные ключевые точки, а справа результат фильтрации точек, в основе которого лежит отсеивание точек по среднему значению евклидова расстояния от предположительного местоположения ПО до каждой сопоставленной ключевой точки, полученной на предыдущем этапе.

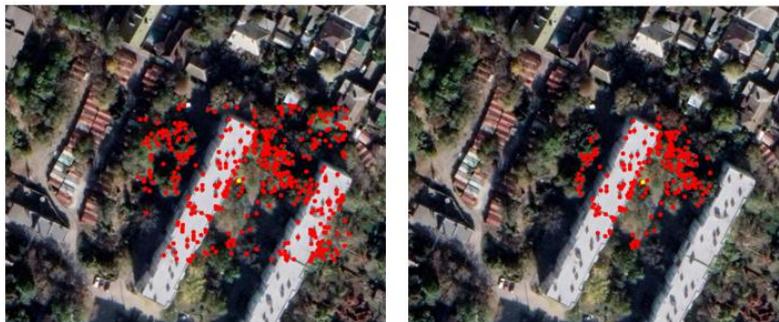


Рис. 12. Результат работы фильтра

Таким образом, для решения задачи сопоставления спутниковых снимков с кадрами местности необходимо выполнить следующие этапы:

- 1) первичная обработка данных;
- 2) реализация выделения ключевых точек алгоритмом SIFT;
- 3) описание ключевых точек алгоритмом SOSNet;
- 4) сопоставление ключевых точек алгоритмом Adalam;
- 5) вывод результата.

Как показали эксперименты, использование именно такой последовательности обработки позволило обеспечить надежное и точное определение координат подвижного объекта на основе входных изображений и геоинформационных данных. В ходе тестирования метода было выявлено, что погрешность определения координат составляет от 2 до 10 метров при работе системы в городской или сельской местности.

Заключение. В статье рассмотрена актуальная проблема определения текущих координат подвижного объекта в условиях нестабильного сигнала от ГНСС. В работе проведён сравнительный анализ алгоритмов компьютерного зрения для обработки кадров видеопотока от бортовой СТЗ подвижного объекта, включая алгоритмы выделения ключевых КТ, алгоритмы описания и сопоставления КТ. На основании проведенного сравнительного анализа алгоритмов был разработан новый метод позиционирования подвижного объекта с использованием бортового оборудования без использования данных глобальной геопривязки. Данный метод заключается в использовании комбинации алгоритмов компьютерного зрения, в частности алгоритма SIFT для выделения КТ, алгоритма описания ключевых точек SOSNet и алгоритма сопоставления изображений AdaLam при сопоставлении спутниковых снимков с кадрами местности, полученными от СТЗ. Алгоритм, реализованный на основе предложенного метода, продемонстрировал свою эффективность при решении задачи сопоставления спутниковых снимков, полученных в разных спектральных диапазонах, с кадрами местности, полученными от СТЗ подвижного объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамов М.М.* Новые и перспективные направления применения беспилотных летательных аппаратов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – Вып. 3 – С. 227-232.
2. *Курьянов А.О.* Глобальные навигационные спутниковые системы: учеб. пособие. – М.: МИИ-ГАиК, 2017. – 76 с.
3. *Мустаев А.Ф.* Инерциальные навигационные системы // Вестник науки. – № 8 (17). – Т. 3. – С. 45-48.
4. *Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А.* Краткий курс теории инерциальной навигации. – М.: ИПУ РАН, 2022. – 148 с.

5. Rublee E. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // Proc. of International conference on computer vision. – 2011. – P. 2564-2571.
6. DeTone D., Malisiewicz T., Rabinovich A. Superpoint: Self-supervised interest point detection and description // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – 2018. – P. 224-236.
7. Зубов И.Г. Метод автоматического определения ключевых точек объекта на изображении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23, № 6. – С. 6-16. – DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-6-16.
8. Макаров А.С., Болсуновская М.В. Сравнительный анализ методов обнаружения особых точек на изображениях при различных уровнях освещения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2018. – № 11:2. – С. 7-18.
9. Bay H., Tinne T., Luc V.G. SURF: speeded up robust features, *Computer Vision and Image Understanding*. – 2008. – Vol. 110, No. 3. – P. 346-359. – DOI: 10.1007/11744023_32.
10. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF // in Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision. – P. 2564-2571. – IEEE, Barcelona, Spain, November 2011. – DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126544.
11. Бондаренко В.А., Каплинский Г.Э., Павлова В.А., Тушиков В.А. Метод поиска и сопоставления ключевых особенностей изображений для распознавания образов и сопровождения объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – С. 281-293.
12. Денисов А.А., Новиков А.И. Анализ методов детектирования, описания и сопоставления ключевых точек изображений // Вестник РГРТУ. – 2024. – № 89. – С. 104-116.
13. Xu N., Nikolentzos G., Vazirgiannis M., Boström H. Image Keypoint Matching Using Graph Neural Networks. In: Benito, R.M., Cherifi, C., Cherifi, H., Moro, E., Rocha, L.M., Sales-Pardo, M. (eds) // Complex Networks & Their Applications X. COMPLEX NETWORKS 2021. Studies in Computational Intelligence. – Vol. 1073. – Springer, Cham, 2022.
14. Новиков А.И., Пронькин А.В. Методы цифровой обработки изображений подстилающей поверхности. – М.: Горячая линия-Телеком, 2023. – 224 с.
15. Mikolajczyk K., Schmid C. A performance evaluation of local descriptors // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2005. – P. 1615-1630.
16. Tavish Srivastava Guide to K-Nearest Neighbors Algorithm in Machine Learning. – Режим доступа: <https://www.analyticsvidhya.com/articles/knn-algorithm/> (дата обращения: 22.11.2024).
17. Chen Y., Zhao L., Mei P. Monochromatic Mutual Nearest Neighbor Queries Over Uncertain Data / In: Sun, X., Pan, Z., Bertino, E. (eds) Artificial Intelligence and Security. ICAIS 2019 // Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 11632. – Springer, Cham, 2019.
18. Lee Byeong-Joo & Baskes, M.I. & Kim, Hanchul & Cho, Yang. Second nearest-neighbor modified embedded atom method potential for BCC transition metals // Phys. Rev. B. – 2001. – 64. – 10.1103/PhysRevB.64.184102.
19. Zhang Y. et al. Local Adaptive Clustering Based Image Matching for Automatic Visual Identification // 2023 China Automation Congress (CAC). – IEEE, 2023. – P. 5686-5690.
20. Debella-Gilo M., Käab A. Locally adaptive template sizes for matching repeat images of mass movements // 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, BC, Canada, 2011 – P. 4281-4284.

REFERENCES

1. Abramov M.M. Novye i perspektivnye napravleniya primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [New and promising directions for the application of unmanned aerial vehicle], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical science], 2022, Issue 3, pp. 227-232.
2. Kupriyanov A.O. Global'nye navigatsionnye sputnikovye sistemy: ucheb. posobie [Global navigation satellite systems: textbook]. Moscow: MII-GAiK, 2017, 76 p.
3. Mustaev A.F. Inertsial'nye navigatsionnye sistemy [Inertial navigation systems], *Vestnik nauki* [Herald of Science], No. 8 (17), Vol. 3, pp. 45-48.
4. Vavilova N.B., Golovan A.A., Parusnikov N.A. Kratkiy kurs teorii inertsial'noy navigatsii [Brief course in the theory of inertial navigation]. Moscow: IPU RAN, 2022, 148 p.
5. Rublee E. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, *Proc. of International conference on computer vision*, 2011, pp. 2564-2571.
6. DeTone D., Malisiewicz T., Rabinovich A. Superpoint: Self-supervised interest point detection and description, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2018, pp. 224-236.
7. Zubov I.G. Metod avtomaticheskogo opredeleniya klyuchevykh toчек ob'ekta na izobrazhenii [Method for automatic detection of key points of an object in an image], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Izvestiya Universities of Russia. Radio Electronics], 2020, Vol. 23, No. 6, pp. 6-16. DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-6-16.

8. *Makarov A.S., Bolsunovskaya M.V.* Sravnitel'nyy analiz metodov obnaruzheniya osobykh tochek na izobrazheniyakh pri razlichnykh urovnyakh osveshcheniya [Comparative analysis of methods for detecting special points in images at different illumination levels], *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific and technical statements of SPbSPU. Computer science. Telecommunications. Management], 2018, No. 11:2, pp. 7-18.
9. *Bay H., Tinne T., Luc V.G.* SURF: speeded up robust features, *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, Vol. 110, No. 3, pp. 346-359. DOI: 10.1007/11744023_32.
10. *Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G.* ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF, in *Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision*, pp. 2564-2571. IEEE, Barcelona, Spain, November 2011. DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126544.
11. *Bondarenko V.A., Kaplinskiy G.E., Pavlova V.A., Tupikov V.A.* Metod poiska i sopostavleniya klyuchevykh osobennostey izobrazheniy dlya raspoznavaniya obrazov i soprovozhdeniya ob"ektov [Method of searching and matching key features of images for pattern recognition and object tracking], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, pp. 281-293.
12. *Denisov A.A., Novikov A.I.* Analiz metodov detektirovaniya, opisaniya i sopostavleniya klyuchevykh tochek izobrazheniy [Analysis of methods for detecting, describing and matching key points of images], *Vestnik RGRU* [Vestnik of RSREU], 2024, No. 89, pp. 104-116.
13. *Xu N., Nikolentzos G., Vazirgiannis M., Boström H.* Image Keypoint Matching Using Graph Neural Networks. In: Benito, R.M., Cherifi, C., Cherifi, H., Moro, E., Rocha, L.M., Sales-Pardo, M. (eds), *Complex Networks & Their Applications X. COMPLEX NETWORKS 2021. Studies in Computational Intelligence*, Vol. 1073. Springer, Cham, 2022.
14. *Novikov A.I., Pron'kin A.V.* Metody tsifrovoy obrabotki izobrazheniy podstilayushchey poverkhnosti [Methods of digital processing of images of the underlying surface]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2023, 224 p.
15. *Mikolajczyk K., Schmid C.* A performance evaluation of local descriptors, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2005, pp. 1615-1630.
16. *Tavish Srivastava* Guide to K-Nearest Neighbors Algorithm in Machine Learning. Available at: <https://www.analyticsvidhya.com/articles/knn-algorithm/> (accessed 22 November 2024).
17. *Chen Y., Zhao L., Mei P.* Monochromatic Mutual Nearest Neighbor Queries Over Uncertain Data, In: Sun, X., Pan, Z., Bertino, E. (eds) *Artificial Intelligence and Security. ICAIS 2019, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 11632. Springer, Cham, 2019.
18. *Lee Byeong-Joo & Baskes, M.I. & Kim, Hanchul & Cho, Yang.* Second nearest-neighbor modified embedded atom method potential for BCC transition metals, *Phys. Rev. B*, 2001, 64. 10.1103/PhysRevB.64.184102.
19. *Zhang Y. et al.* Local Adaptive Clustering Based Image Matching for Automatic Visual Identification, *2023 China Automation Congress (CAC)*. IEEE, 2023, pp. 5686-5690.
20. *Debella-Gilo M., Käab A.* Locally adaptive template sizes for matching repeat images of mass movements, *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, BC, Canada, 2011*, pp. 4281-4284.

Лищенко Егор Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: lishchenkov@gmail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Мельник Эдуард Всеволодович – e-mail: evm17@mail.ru; кафедра вычислительной техники; д.т.н.; профессор.

Матвиенко Александр Сергеевич – e-mail: _matvienko_@mail.ru; аспирант.

Будко Артем Юрьевич – НИИ Робототехники и процессов управления ЮФУ; e-mail: abudko@sfedu.ru; к.т.н.; с.н.с.

Lishchenko Egor Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: lishchenkov@gmail.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer Science; assistant.

Melnik Eduard Vsevolodovich – e-mail: evm17@mail.ru; the Department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.

Matvienko Aleksandr Sergeevich – e-mail: _matvienko_@mail.ru; postgraduate.

Budko Artem Yur'evich – Research and Development Institute of Robotics and Control Systems SFedU; e-mail: abudko@sfedu.ru; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Раздел II. Анализ данных и моделирование

УДК 631.171:303.732.4

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-97-113

В.В. Соловьев, А.Я. Номерчук, Р.К. Филатов

СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЕЛЬТА-РОБОТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Целью данной работы является разработка системы планирования траекторий перемещения дельта-робота для прополки сорняков. Дельта-робот устанавливается на мобильной платформе, которая перемещается в междурядьях культурных растений. Система технического зрения обнаруживает сорняки и определяет их координаты. Требуется планировать траекторию движения схвата при прополке сорняков без повреждения самого робота и культурных растений. Данное исследование является актуальным из-за увеличения численности населения, уменьшения пахотных площадей, естественного оттока населения из сельской местности и снижения количества сельскохозяйственной техники. Для достижения поставленной цели в работе представлено решение прямой и обратной задачи кинематики дельта-робота аналитическим методом. Предложена модель определения конструктивных параметров дельта-робота, позволяющая оценить степень влияния конструктивных параметров на его рабочую область. Определены длины рычагов дельта-робота, соответствующие поставленной задаче для прополки сорняков на кукурузных полях. Решена задача планирования траекторий путем декомпозиции на движение схвата в горизонтальной плоскости и движение по вертикали, с учетом размера комков земли и величины извлечения сорняка почвы. По результатам экспериментальных исследований показана возможность существенного уменьшения количества точек траектории движения схвата, что снижает вычислительную сложность предложенных методов и упрощает их реализацию в бортовом вычислителе робота.

Дельта-робот; планирование траекторий; коррекция траекторий перемещения; область функционирования робота, задачи кинематики.

V.V. Soloviev, A.Y. Nomerchuk, R.K. Filatov

TRAJECTORY PLANNING SYSTEM FOR THE MOVEMENT OF A DELTA ROBOT FOR AGRICULTURAL PURPOSES

The aim of this work is to develop a trajectory planning system for the movement of a delta robot used for weed cultivation. The delta robot is mounted on a mobile platform that moves between rows of cultivated plants. A vision system detects weeds and determines their coordinates. The system is tasked with planning the trajectory of the robot's gripper during weed removal, ensuring no damage is done to either the robot or the plants. This research is highly relevant due to the growing global population, decreasing arable land, rural depopulation, and a reduction in the availability of agricultural machinery. To achieve this goal, the work presents a solution to both the forward and inverse kinematics of the delta robot using an analytical approach. A model for determining the structural parameters of the delta robot is proposed, which allows the evaluation of how these parameters affect the robot's working area. The lengths of the delta robot's arms are determined, tailored to the task of weed removal in corn fields. The trajectory planning problem is addressed by decomposing the motion into horizontal movement of the gripper and vertical movement, considering the size of soil clumps and the magnitude of weed extraction. Experimental results demonstrate the possibility of significantly reducing the number of trajectory points, thus lowering the computational complexity of the proposed methods and simplifying their implementation in the robot's onboard computer.

Delta robot; trajectory planning; trajectory correction; robot working area; kinematic problems.

Введение. Дельта-робот изобрел в начале 80-х годов прошлого века швейцарский учёный Реймонд Клавель. Конструкция дельта-робота детально описана в его патенте US4976582 на «Устройство для перемещения и позиционирования элемента в пространстве» [1]. Основными достоинствами робота являются простота конструкции и высокая скорость перемещения рабочего органа. К недостаткам можно отнести относительно невысокую грузоподъемность от 1 до 12 кг. В нашей стране в сельском хозяйстве дельта-роботы пока не применяются, хотя в США, Швейцарии, Австралии и других странах они интенсивно разрабатываются и внедряются [2]. Конструктивно роботы для борьбы с сорняками представляют собой мобильную подвижную платформу [3] с установленным на ней дельта-роботом. Платформа движется вдоль рядов с растениями, а дельта-робот с системой технического зрения удаляет сорняки.

Как показано в работе [4] при применении существующих технологий обработки земель к 2030 году возникнет критический дефицит продуктов. Одним из вариантов решения данной проблемы является цифровизация сельского хозяйства. В США и Канаде 70% сельскохозяйственных земель обрабатываются с применением цифровых технологий, что повышает эффективность их использования на 20% и более. В нашей стране уровень цифровизации в сельском хозяйстве составляет менее 10%, что свидетельствует об актуальности исследований в данной работе.

В тоже время у нас проблеме цифровизации сельского хозяйства уделяется повышенное внимание, что закреплено в распоряжении Правительства РФ 29 декабря 2021 года № 3971-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отраслей агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года» [5].

В свободном доступе есть большое количество публикаций, описывающих конструктивные особенности, модели и методы управления дельта-роботами. Например, работа [6] посвящена разработке модели динамики дельта-робота на основе динамики Лагранжа и Гамильтона. В статье [7] предложен метод повышения точности позиционирования рабочего органа дельта-робота с использованием обратной связи от видеокамер. Описана прямая и обратная задача кинематики для дельта-робота. Разработан алгоритм вычисления координат точки пространства, в которую должен переместиться рабочий орган. Публикация [8] посвящена разработке математической модели дельта-робота, который применяется для сортировки бытовых отходов. Авторы сосредоточились на разработке универсальной математической модели для решения обратной задачи кинематики. Статья [9] посвящена определению кинематических параметров дельта-робота на основании параметров требуемой области функционирования. Авторы представили расчетную модель, позволяющую по заданным размерам области функционирования робота, вычислить длины рычагов и карданных шарниров. В отличие от других работ, в публикации [10] рассматривается дельта-робот с дополнительным телескопическим сочленением между неподвижным основанием и подвижной площадкой. Телескопический стержень позволяет дополнительно вращать подвижную площадку. Работа [11] посвящена разработке натурной модели мобильной платформы с дельта-роботом для борьбы с сорняками. Обработку изображений для распознавания растений выполняет RSNN-нейронная сеть, обеспечивающая, по заявлениям автора точность обнаружения и распознавания сорняков на уровне 99,5%. В статье [12] решена обратная задача кинематики для дельта-робота. Представлен алгоритм планирования траекторий движения рабочего органа при решении задачи перестановки объектов. В работе [13] рассмотрена конструкция дельта-робота, рассчитана степень подвижности, приведены примеры применения в промышленности и быту. Представлены результаты анализа кинематики и решена прямая и обратная задачи кинематики. Представлено большое количество примеров с решениями прямой и обратной задачи кинематики, а также примеры для проверки результатов решения методами, которые разработали другие авторы. Статья [14] посвящена исследованию дельта-робота с двумя рычагами, т.е. движущимися в одной плоскости. Для него решены прямая и обратная задачи кинематики. Проведены модельные эксперименты, которые показали, что отклонение рабочего органа с нагрузкой 0,2 кг и скоростью перемещения 2,618 м/с не превышает 0,6 мм.

По результатам обзора публикаций можно сделать следующие выводы:

- ◆ существует достаточно большое количество методов решения прямой и обратной задач кинематики, но требуется их совершенствование для повышения быстродействия и снижения объема вычислений в бортовом вычислителе робота;
- ◆ требуют уточнения методы определения кинематических параметров дельта-робота в зависимости от конфигурации окружающего пространства;
- ◆ методы планирования траекторий перемещения рабочего органа дельта-робота в условиях помех со стороны окружающей среды еще недостаточно развиты.

Постановка задачи. В данной работе необходимо разработать система планирования траекторий перемещения дельта-робота сельскохозяйственного назначения. Робот предназначен для прополки сорняков на кукурузных полях с шириной междурядий 45 см и предельной высотой культуры 50 см. При большей высоте кукурузы необходимость в прополке отпадает.

Требуется:

- ◆ разработать расчетную модель для определения параметров дельта-робота при заданных исходных данных;
- ◆ провести исследование кинематики и динамики дельта-робота;
- ◆ разработать метод планирования траекторий перемещения схвата с учетом изменения характеристик поверхности земли, величины извлечения сорняка и возможных препятствий на пути движения робота.

Обратная задача кинематики дельта-робота. Для разработки модели кинематики рассмотрим структуру дельта-робота, которая представлена на рис. 1,а.

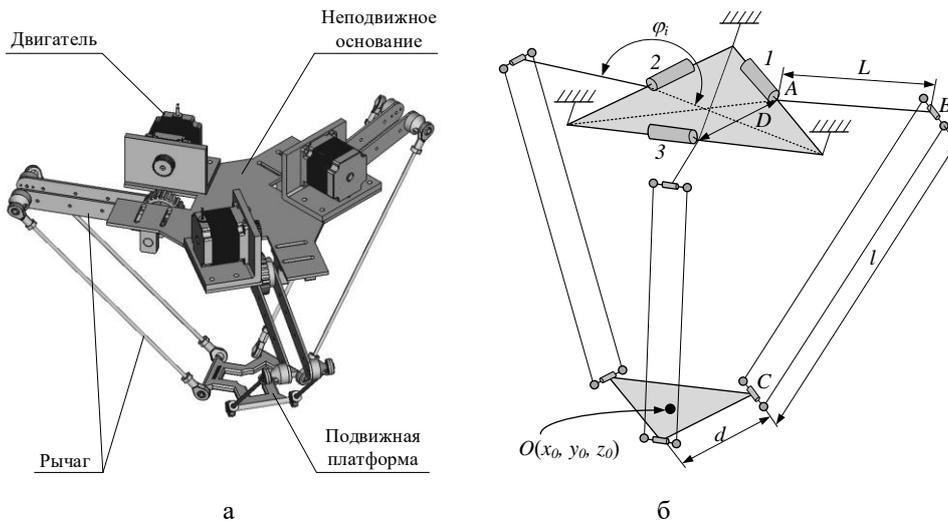


Рис. 1. Структура дельта-робота (а) и его упрощенная схема (б)

В составе робота можно выделить три двигателя, три верхних и нижних рычага, неподвижное основание и подвижную платформу, на которой крепится рабочий орган. Двигатели с редукторами крепятся на неподвижном основании, чем и обеспечивается высокая скорость перемещения робота.

Для вывода уравнений кинематики удобнее воспользоваться упрощенной схемой робота, которая представлена на рис. 1,б. Введем систему координат $OXYZ$, связанную с неподвижным основанием. Ось Y направлена к точке крепления рычага I в плоскости основания. Ось X , также лежит в плоскости основания, а ось Z направлена вертикально вверх, как представлено на рис. 2,а.

Рычаг AB перемещается в плоскости YZ и описывает сектор окружности радиусом равным AB и центром в точке A , как представлено на рис. 2,б. Сферические шарниры в точках B и C позволяют перемещаться рычагу BC в пространстве и описывать сферу радиусом BC и центром в точке C . Сфера пересекается с плоскостью YZ по окружности радиусом C_1B , где C_1 проекция точки C на плоскость YZ . Если определить координаты точки B , то можно найти угол поворота рычага AB .

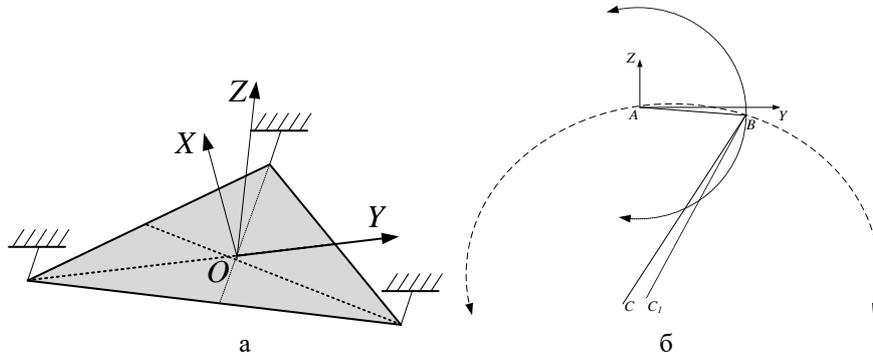


Рис. 2. Система координат (а) и расчетная схема (б) дельта-робота

Пусть центральная точка подвижной платформы имеет координаты $O(x_0, y_0, z_0)$. Тогда координаты точки C можно вычислить по формулам:

$$OC = \frac{d}{\sqrt{3}},$$

$$C \left(x_0, y_0 + \frac{d}{\sqrt{3}}, z_0 \right).$$

Координаты точки C_1 будут следующими:

$$C_1 \left(0, y_0 + \frac{d}{\sqrt{3}}, z_0 \right).$$

Длину отрезка BC_1 можно вычислить по теореме Пифагора:

$$BC_1 = \sqrt{BC^2 - CC_1^2} = \sqrt{l^2 - x_0^2}.$$

Если провести описанную окружность вокруг равностороннего треугольника расположения приводных двигателей со стороной D , то можно вычислить ее радиус по формуле:

$$R = \frac{D}{\sqrt{3}},$$

который является координатой y для точки A :

$$y_A = \frac{D}{\sqrt{3}}.$$

Тогда координаты точки A будут следующими:

$$A \left(0, \frac{D}{\sqrt{3}}, 0 \right).$$

Координаты точки B можно вычислить из системы уравнений для двух окружностей:

$$\begin{cases} (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2 = L^2, \\ (y_B - y_{C_1})^2 + (z_B - z_{C_1})^2 = l^2 - x_0^2. \end{cases}$$

С учетом координат центров окружностей для точек A и C_1 получим:

$$\begin{cases} \left(y_B - \frac{D}{\sqrt{3}} \right)^2 + z_B^2 = L^2, \\ \left(y_B - y_0 - \frac{d}{\sqrt{3}} \right)^2 + (z_B - z_0)^2 = l^2 - x_0^2. \end{cases}$$

В результате решения системы уравнений получим координаты точки B , на основании которых можно найти угол поворота рычага:

$$\varphi = \operatorname{atan} \frac{z_B}{z_A - y_B}.$$

Для поиска углов наклона рычагов для других моторов выполним поворот системы координат вокруг оси Z сначала на 120° , а затем на 240° , что существенно упрощает расчеты.

Матрица поворота в данном случае имеет вид:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где α – угол поворота системы координат.

Тогда координаты точки O в новых координатах могут быть рассчитаны по формулам:

$$\begin{aligned} x_{120} &= x_0 \cdot \cos 120^\circ + y_0 \cdot \sin 120^\circ, \\ y_{120} &= -x_0 \cdot \sin 120^\circ + y_0 \cdot \cos 120^\circ, \\ z_{120} &= z_0, \\ x_{240} &= x_0 \cdot \cos 240^\circ + y_0 \cdot \sin 240^\circ, \\ y_{240} &= -x_0 \cdot \sin 240^\circ + y_0 \cdot \cos 240^\circ, \\ z_{240} &= z_0. \end{aligned}$$

Таким образом, задавая координаты подвижной платформы, можно вычислить углы поворота, на которые нужно повернуть верхние рычаги, чтобы подвижная платформа переместилась в требуемую точку.

Прямая задача кинематики дельта-робота. Пусть известны углы поворота верхних рычагов $\varphi_i, i = 1, 2, 3$ и необходимо найти координаты (x_0, y_0, z_0) точки O .

Плечи нижних рычагов вращаясь описывают в пространстве три сферы с радиусами l . Выполним параллельный перенос нижних рычагов в направлении точки O , как показано стрелками на рис. 3,а. Очевидно, что можно сместить рычаги таким образом, что все сферы пересекутся в единственной точке O . Следовательно, чтобы найти координаты точки O нужно решить систему уравнений для трех сфер, которые пересекаются в ней. Причем, радиусы сфер известны.

На рис. 3,б представлена расчетная схема для вывода уравнений сфер. Согласно рисунку: $OA_1 = OA_2 = OA_3 = \frac{D}{\sqrt{3}}$, $B_1B'_1 = B_2B'_2 = B_3B'_3 = \frac{d}{\sqrt{3}}$, $A_1B_1 = L \cdot \cos \varphi_1$, $A_2B_2 = L \cdot \cos \varphi_2$, $A_3B_3 = L \cdot \cos \varphi_3$, $B'_1(0; -\frac{D-d}{2\sqrt{3}} - L \cdot \cos \varphi_1; -L \cdot \sin \varphi_1)$,

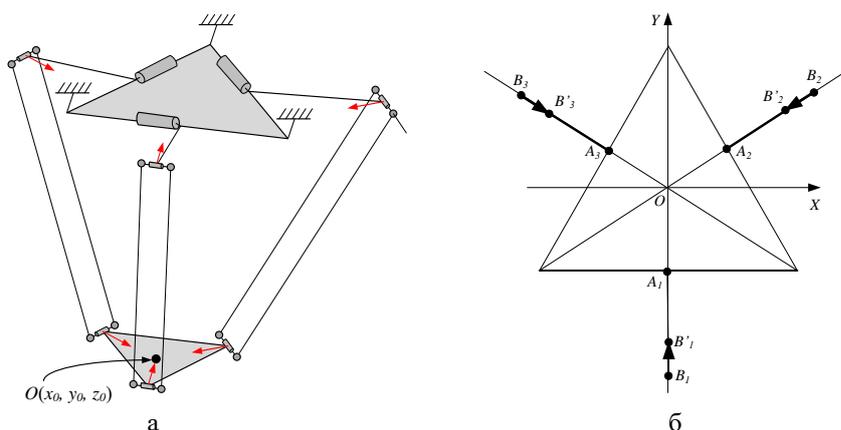


Рис. 3. Перенос нижних рычагов (а) и дополнительные построения (б) для вывода системы уравнений

$$B'_2 \left(\left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_2 \right] \cos 30^\circ ; \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_2 \right] \sin 30^\circ ; -L \cdot \sin \varphi_2 \right),$$

$$B'_3 \left(- \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_3 \right] \cos 30^\circ ; \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_3 \right] \sin 30^\circ ; -L \cdot \sin \varphi_3 \right),$$

Введем замену переменных:

$$x_1 = 0, y_1 = -\frac{D-d}{2\sqrt{3}} - L \cdot \cos \varphi_1, z_1 = -L \cdot \sin \varphi_1,$$

$$x_2 = \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_2 \right] \cos 30^\circ, y_2 = \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_2 \right] \sin 30^\circ,$$

$$z_2 = -L \cdot \sin \varphi_2,$$

$$x_3 = - \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_3 \right] \cos 30^\circ, y_3 = \left[\frac{D-d}{2\sqrt{3}} + L \cdot \cos \varphi_3 \right] \sin 30^\circ,$$

$$z_3 = -L \cdot \sin \varphi_3.$$

Запишем систему уравнений для трех сфер:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = l^2, \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = l^2, \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = l^2, \end{cases}$$

из которой можно найти координаты (x, y, z) для точки O .

Модель определения конструктивных параметров дельта-робота. На основе кинематических моделей можно разработать программную модель для определения рабочей области дельта-робота и уточнить ограничения, размеры рычагов и платформ. Модель удобнее реализовать в среде MATLAB [15], т.к. она ориентирована на выполнение научных и инженерных расчетов и позволяет с минимальными затратами времени получить готовую модель либо в виде программного кода, либо в виде структурной схемы.

При разработке программной модели определены следующие блоки:

- ◆ блок ввода исходных данных: длина верхнего рычага (L), длина нижнего рычага (l), размер верхней платформы (D), размер нижней (подвижной) платформы (d), максимальный угол отклонения верхнего рычага (φ_{max}), минимальный угол отклонения верхнего рычага (φ_{min});
- ◆ блок основных вычислений, согласно моделям кинематики робота;
- ◆ блок вывода результатов: в графическом формате в виде облака точек, в текстовом формате (размеры области функционирования робота).

Для исследования влияния параметров робота на область функционирования применим следующее:

- ◆ длины верхних и нижних рычагов находится в соотношении 1:2;
- ◆ предельная длина нижнего рычага 1 м;
- ◆ углы наклона верхних рычагов лежат в интервале $-35^\circ \dots +105^\circ$;
- ◆ размер нижней платформы меньше размера верхней платформы.

На рис. 4,а показан трехмерный вид рабочей области дельта робота при следующих исходных данных:

- ◆ $R = 80$ мм – радиус вписанной окружности верхнего основания;
- ◆ $r = 25$ мм – радиус вписанной окружности нижней платформы;
- ◆ $l = 325$ мм – длина нижнего рычага;
- ◆ $L = 120$ мм – длина верхнего рычага.

На рис. 4,б-г представлены проекции облака точек рабочей области функционирования дельта робота на плоскости декартовой системы координат.

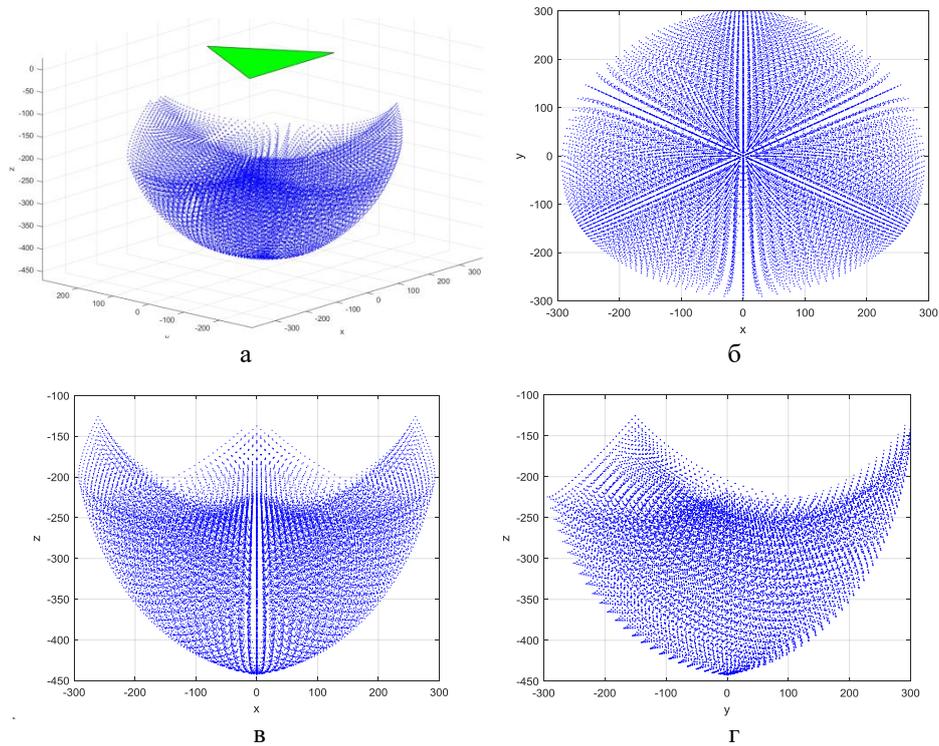


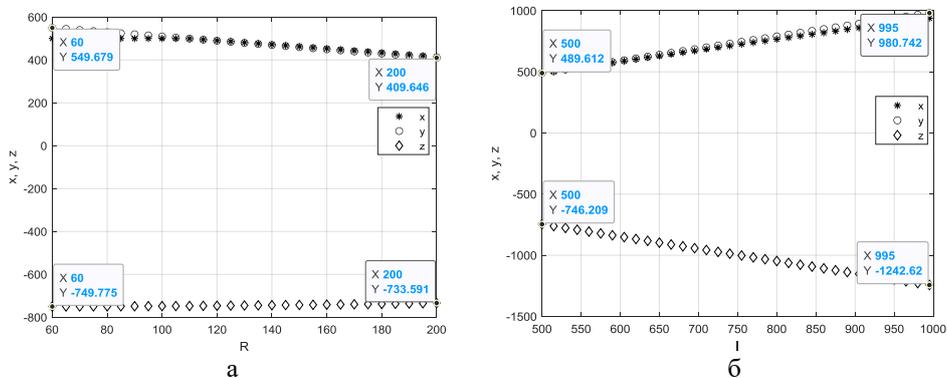
Рис. 4. Трехмерный вид (а) и проекции на плоскости XY (б), XZ (в), YZ (г) рабочей области дельта робота

Из рисунков видно, что область функционирования робота симметричная и похожа на параболоид. При заданных исходных данных порядка 200 мм пространства под неподвижной платформой недоступны для подвижной платформы, а также предельная длина по оси Z составляет 442 мм.

Примем базовые параметры дельта-робота для моделирования:

- ◆ $R = 120$ мм – радиус вписанной окружности верхнего основания;
- ◆ $r = 45$ мм – радиус вписанной окружности нижней платформы;
- ◆ $l = 500$ мм – длина нижнего рычага;
- ◆ $L = 250$ мм – длина верхнего рычага.

Последовательно варьируя каждый базовый параметр и фиксируя остальные можно получить графики изменения рабочей области функционирования робота, представленные на рис. 5.



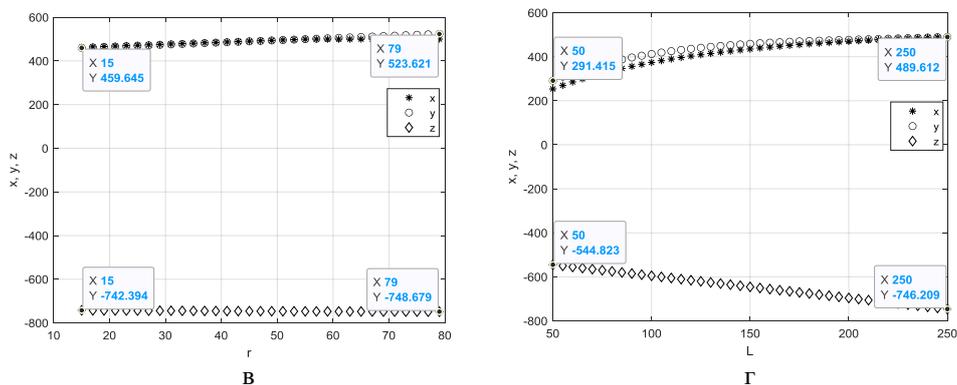


Рис. 5. Изменение области функционирования робота от размеров неподвижной платформы (а), длины нижнего рычага (б), размеров подвижной платформы (в), длины верхнего рычага (г)

Согласно рис. 5,а при увеличении размеров неподвижной платформы в 3,33 раза, на которой закреплены двигатели робота, рабочая глубина по оси Z уменьшается незначительно на 2%. Размеры рабочей области по осям X и Y уменьшаются на 25%. Согласно рис. 5,б при увеличении длины нижних рычагов в 2 раза, рабочая глубина по оси Z увеличивается на 66%. Размеры рабочей области по осям X и Y увеличиваются на 100%. Согласно рис. 5,в при увеличении размеров подвижной платформы в 8 раз, рабочая глубина по оси Z практически не изменяется. Размеры рабочей области по осям X и Y увеличиваются на 14%. Согласно рис. 5,г при увеличении длины верхнего рычага в 5 раз, рабочая глубина по оси Z увеличивается на 37%. Размеры рабочей области по осям X и Y увеличиваются на 68%. По результатам моделирования видно, что наибольший вклад в изменение области функционирования робота оказывают размеры верхних и нижних рычагов.

Определение длины рычагов дельта-робота. Согласно проведенным исследованиям и требованиям к обработке междурядьев шириной 45 см и высотой сельскохозяйственных культур 50 см проведено моделирование параметров робота для обработки одновременно двух междурядьев и выстроена рабочая область, представленная на рис. 6.а.

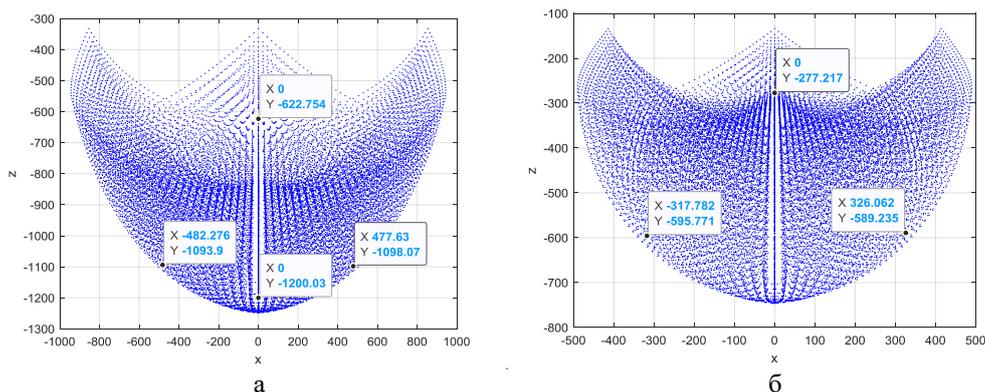


Рис. 6. Размеры области функционирования робота для обработки двух (а) и одного (б) междурядьев

Согласно результатам моделирования дельта-робот сможет обслуживать два междурядья при длине верхних рычагов $L = 250$ мм и длине нижних рычагов $l = 1000$ мм. При этом общая высота робота составит 1200 мм, с «мертвой зоной» по оси Z 600 мм.

Результаты моделирования области функционирования дельта-робота при обработке одного междурыжья представлены на рис. 6, б. Согласно результатам моделирования дельта-робот сможет обслуживать одно междурыжье при длине верхних рычагов $L = 250$ мм и длине нижних рычагов $l = 500$ мм. При этом общая высота робота составит 750 мм, с «мертвой зоной» по оси Z 300 мм. Таким образом, для снижения массогабаритных параметров и повышения жесткости конструкции целесообразно реализовать робота для обработки одного междурыжья.

Планирование траектории движения схвата робота. Задача локального планирования траекторий движения может решаться с применением интеллектуальных алгоритмов и методов [16], методом потенциальных полей [17], методом с использованием неустойчивых режимов движения [18], аналитическими и гибридными методами [19].

В данной работе задачу планирования траекторий подвижной платформы дельта-робота в среде без препятствий будем рассматривать с позиции поиска траектории движения между текущей точкой подвижной платформы $O_1(x_T, y_T, z_T)$ и заданной точкой $O_2(x_K, y_K, z_K)$ за ограниченное время t_c . На рис. 7 показаны возможные кривые для изменения углов наклона верхних рычагов при движении подвижной платформы из точки O_1 в O_2 .

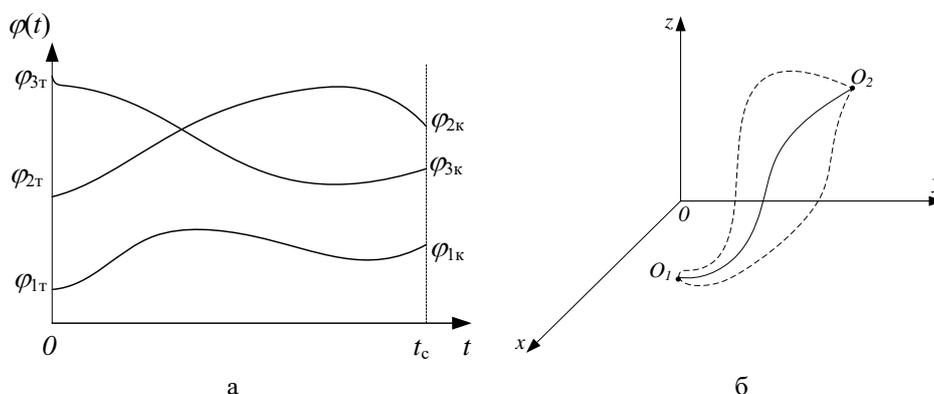


Рис. 7. Изменение углов φ_i при перемещении подвижной платформы из точки O_1 в O_2 (а) и траектория движения подвижной платформы (б)

Согласно рис. 7 на углы и угловые скорости движения рычагов дельта-робота при отработке траектории из точки O_1 в O_2 накладываются следующие ограничения:

$$\varphi_{0i}(0) = \varphi_{0j}, \varphi_{ki}(t_c) = \varphi_{kj}, \dot{\varphi}_{0i}(0) = 0, \dot{\varphi}_{ki}(t_c) = 0,$$

где φ_{0j} , φ_{kj} – начальные и конечные углы ориентации верхних рычагов.

Предположим, что дельта-робот функционирует в хорошо формализованной среде при отсутствии препятствий. В этом случае, траекторию его движения следует рассматривать как кривую в трехмерном пространстве, по которой перемещается схват робота. Пространственную траекторию можно представить как множество точек, через которую можно провести кривую и в этом смысле задачу планирования траектории перемещения можно рассматривать как задачу интерполяции.

В работе [20] представлен эффективный метод интерполяции из заданного множества точек, позволяющий получить гладкую кривую. Результирующая кривая проходит через каждую точку и представляет собой композицию полиномов третьего порядка. Рассмотрим пару соседних точек (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) , которые заданы априорно. Для них можно вычислить величину наклона сплайна по формуле:

$$m_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}.$$

Тогда средневзвешенное значение наклона s_i для сплайна может быть определено по формуле:

$$s_i = \frac{|m_{i+1}-m_i||m_{i-1}|+|m_{i-1}-m_{i-2}||m_i|}{|m_{i+1}-m_i|+|m_{i-1}-m_{i-2}|}.$$

Если знаменатель выражения для s_i становится равным нулю, то средневзвешенное значение определяется формулой:

$$s_i = \frac{m_{i-1}+m_i}{2}.$$

Сплайн представляется функцией третьего порядка в виде многочлена:

$$P_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3.$$

где $a_i = y_i$, $b_i = s_i$, $c_i = \frac{3m_i - 2s_i - s_{i+1}}{x_{i+1} - x_i}$, $d_i = \frac{s_i + s_{i+1} - 2m_i}{(x_{i+1} - x_i)^2}$.

В этом случае сплайн является дифференцируемой функцией. Как видно из описания метода, его достаточно просто реализовать в управляющем контроллере дельта-робота.

В отличие от плоского движения, движение в пространстве описывается сложной системой уравнений, что требует производительного устройства управления. В данном случае, целесообразно разделить движения робота на отдельные движения в плоскости OXY и в вертикальной плоскости вдоль оси Z , найти массивы точек перемещения и объединить в единый ряд данных. При этом, неоптимальность траектории будет компенсироваться высокой скоростью перемещения робота в пространстве.

На рис. 8 представлена обобщенная траектория движения схвата робота в плоскости вдоль оси Z .

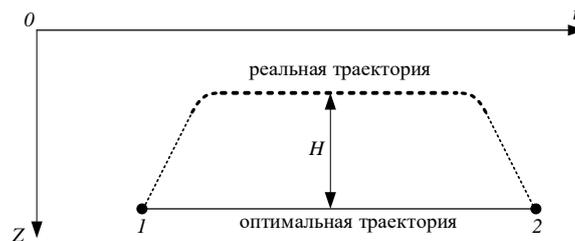


Рис. 8. Траектория движения схвата робота в плоскости вдоль оси Z

Как видно из рис. 8, схват робота перемещается из точки 1 в точку 2 по некоторой трапецевидной траектории. Она отличается от оптимальной траектории из-за неоднородности земли в обрабатываемом междурядье, что требует подъема схвата на некотором расстоянии над землей для исключения его повреждений, а также требует извлечения захваченного сорняка из земли и перемещения схвата вдоль оси Z . Высота трапеции определяется диаметром комков земли в междурядье и требуемой высотой извлечения сорняка из земли и может быть описана неравенством:

$$H \geq \max(\delta h_1, \delta h_2).$$

где δh_1 – диаметр комков земли в междурядье; δh_2 – высота извлечения сорняка из земли.

Очевидно, что высота извлечения сорняка из земли может задаваться априорно ($\delta h_2 = const$), по результатам обследования обрабатываемого участка, а диаметр комков земли в междурядье может оцениваться системой технического зрения робота в реальном времени ($\delta h_1 = var$). Тогда возможны следующие траектории движения схвата робота в вертикальной плоскости, как представлено на рис. 9. Согласно рисунку, робот захватывает сорняк в точке 1, разводит схват в точке 2 и перемещается к новому сорняку в точке 3.

Очевидно, что перемещение схвата с сорняком в плоскости OXY , когда он еще не полностью извлечен из земли приведет к возрастанию нагрузок на подвижное основание робота. Поэтому в случае $\delta h_1 < \delta h_2$ переход с вертикального на горизонтальное движение осуществляется под углом в 45° , что позволит гарантированно извлечь сорняк из земли и уменьшить общую длину траектории из точки 1 в точку 3.

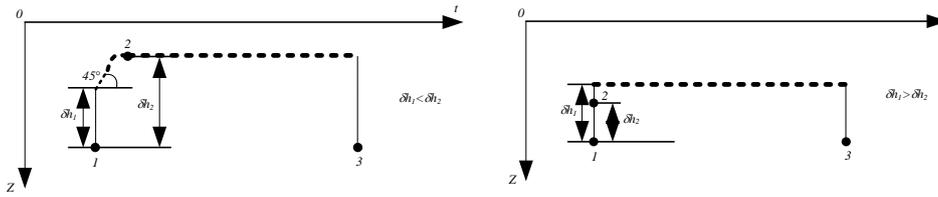


Рис. 8. Возможные траектории движения схвата робота в зависимости от соотношения величин δh_i

Участки земли для обработки роботами должны быть заранее подготовлены: удалены камни и ветки, разбиты комья земли и т.п. Поэтому с учетом результатов предыдущего пункта в качестве препятствий следует рассматривать растения обрабатываемой культуры, которые могут быть повреждены подвижной платформой и схватом робота, особенно на уровне земли.

Допустим, система технического зрения робота определяет координаты культурного растения (x_k, y_k) в ряду и растения посажены на таком расстоянии, что между ними может переместиться подвижная платформа со схватом без их повреждения. Введем понятие радиус безопасности $r_b > \frac{d}{\sqrt{3}}$ вокруг растения. Тогда, для безопасного движения вокруг растения необходимо обеспечить выполнение неравенства:

$$\sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2} \geq r_b,$$

где x_0, y_0 – координаты центра подвижной платформы со схватом.

Координаты границ окружности можно вычислить по формулам:

$$\begin{cases} x_i = x_k + r_b \cdot \cos(\alpha_i), \\ y_i = y_k + r_b \cdot \sin(\alpha_i), \\ \alpha_i = \alpha_{i-1} + \delta\alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где $\delta\alpha$ – задается априорно исходя из требуемой гладкости траектории обхода растения.

Для определения диапазона изменения угла α_i рассмотрим рис. 9.

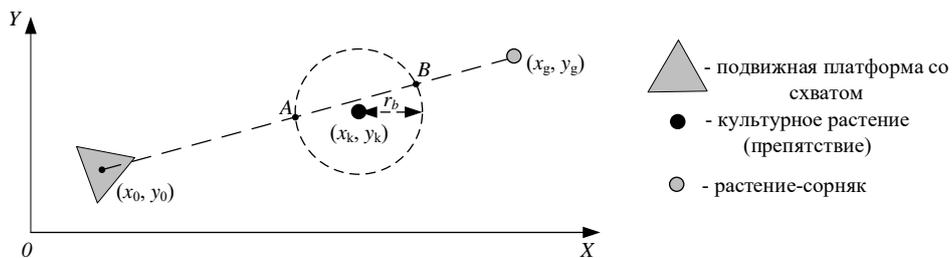


Рис. 9. К определению диапазона изменения угла α_i

Согласно рис. 9 нужно переместить подвижную платформу из точки с координатами (x_0, y_0) к сорняку с координатами (x_g, y_g) . Прямая соединяющая эти точки может не иметь пересечений с окружностью вокруг препятствия, иметь одно или два пересечения. Уравнение прямой по двум точкам, совместно с уравнением окружности образуют систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{x-x_0}{x_k-x_0} = \frac{y-y_0}{y_k-y_0}, \\ (x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 \geq r_b^2. \end{cases} \quad (2)$$

В случае пересечения прямой и окружности решение системы уравнений (2) позволяет получить координаты (x_A, y_A) и (x_B, y_B) , которые после подстановки в (1) позволят найти α_A и α_B .

Результаты модельных экспериментов. Программное обеспечение для моделирования движения схвата робота в пространстве с учетом препятствий реализовано в среде PyCharm на языке Python. Приняты следующие параметры моделирования $\delta h_1 = 0,025$ м; $\delta h_2 = 0,05$ м; $\delta \alpha = 5\pi/180$ рад; $r_b = 0,07$ м; $d = 0,025$ м.

При моделировании обрабатывалось перемещение схвата робота по диагонали в среде размером 0,5x0,5 метров с одиночными, двойными и тройными растениями-препятствиями, как представлено на рис. 10.

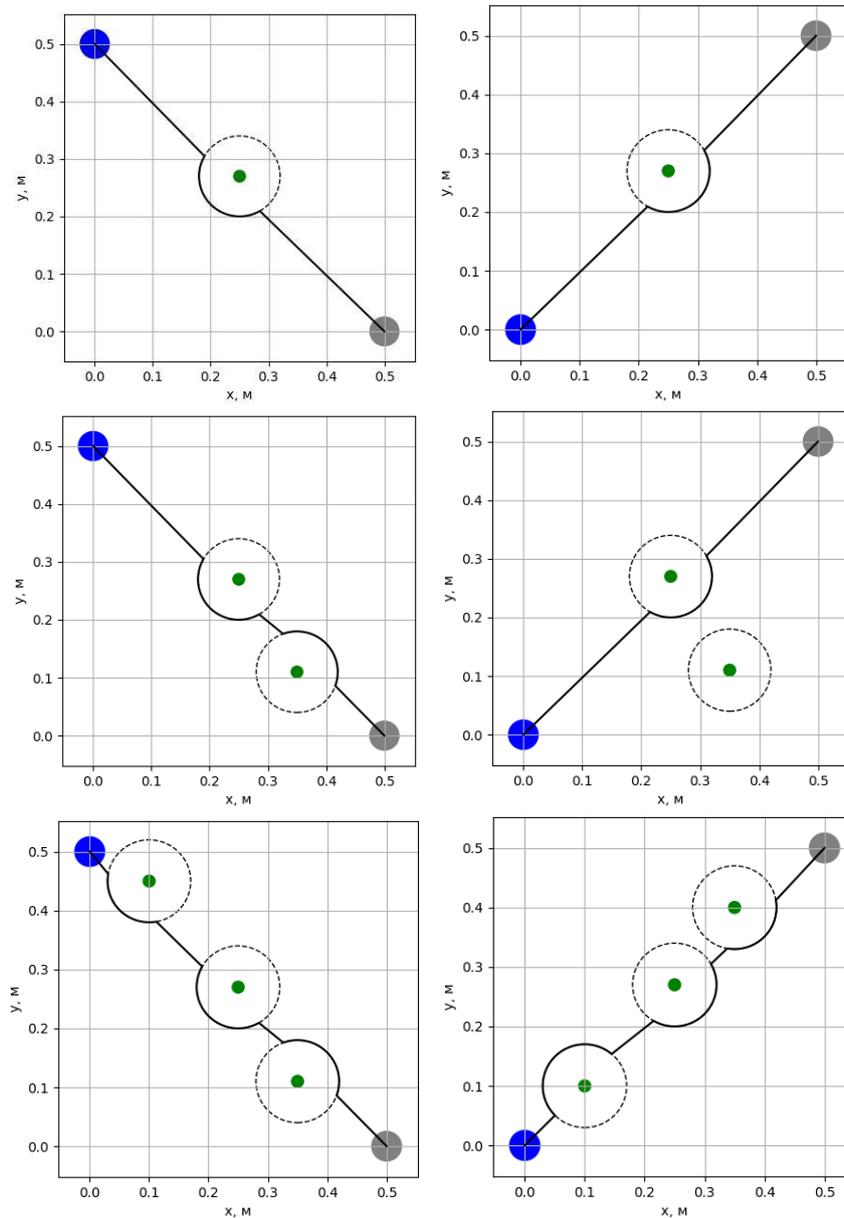


Рис. 10. Движение схвата робота в среде с препятствиями

По результатам моделирования установлено, что алгоритм корректно обрабатывает во всех четвертях системы координат и рассчитывает траекторию движения на границах окружностей безопасности на препятствиях. При заданном приращении угла в 5 градусов при расчете участка траектории вокруг препятствия полная траектория движения содержала от 30 точек (для одиночного препятствия) до 90 точек (для трех препятствий).

На рис. 11 представлены результаты моделирования при изменении шага угла обхода препятствий для среды с тремя препятствиями.

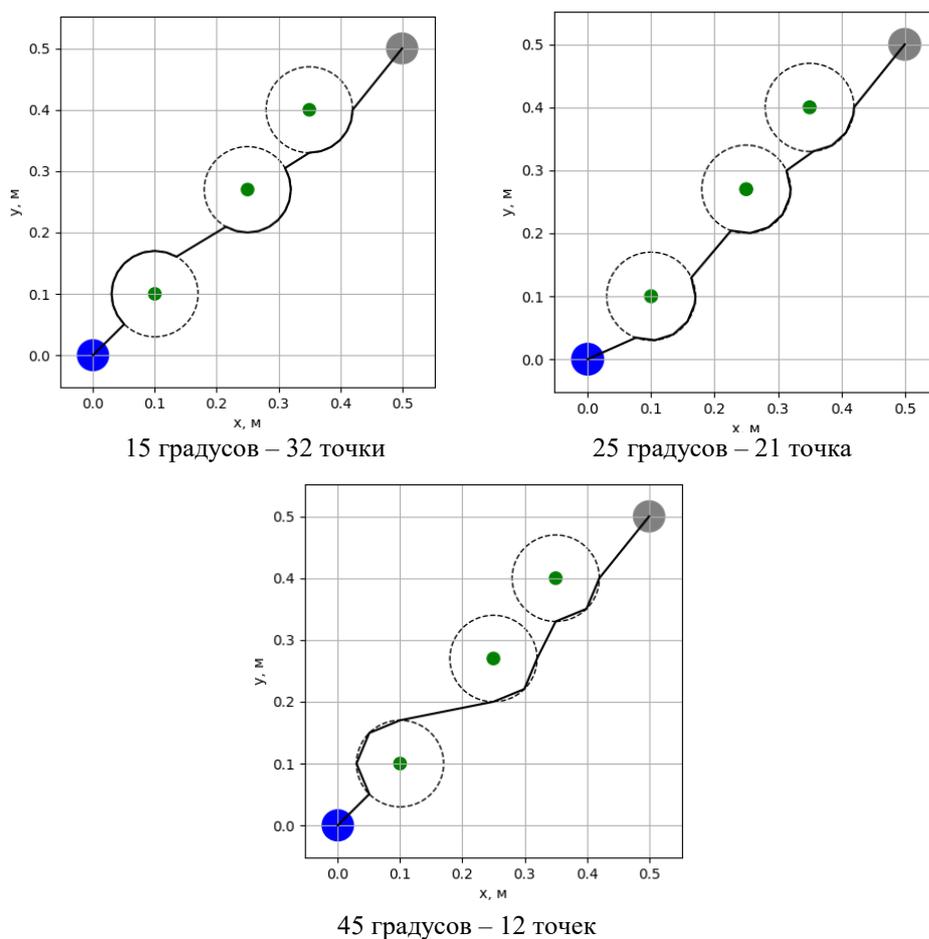


Рис. 11. Результаты моделирования при изменении шага угла

Согласно результатам моделирования при увеличении шага угла можно существенно снизить размер массива координат точек траектории и, следовательно, повысить вычислительную эффективность алгоритма. При этом количество точек траектории уменьшилось на 86% (с 90 до 12), а также снизилась точность движения по траектории при обходе препятствий, что можно компенсировать увеличением радиуса безопасности вокруг препятствий на 10%.

Также предложенные алгоритмы корректно обрабатывают случай близкого расположения препятствий, как представлено на рис. 12.

Как видно из результатов, траектория движения корректно сформирована по контурам окружностей безопасности вокруг препятствий.

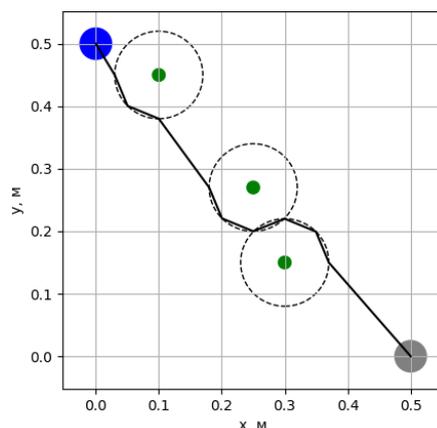


Рис. 12. Траектория движения схвата при близком расположении препятствий

Заключение. В статье представлено решение задачи планирования траектории движения дельта-робота для прополки сорняков. Представлено решение прямой и обратной задач кинематики на базе аналитического подхода, допускающее простую программную реализацию в управляющем контроллере робота. Представлена программная модель определения конструктивных параметров дельта-робота, позволяющая оценить степень влияния размеров подвижной и неподвижной платформ, длины верхних и нижних рычагов на рабочую область функционирования робота. Установлено, что наибольшее влияние на размер этой области оказывают длины рычагов робота. Определена длина рычагов робота для решения задачи прополки кукурузы и установлено, что целесообразно конструировать робота для прополки одного междурядья. Представлен аналитический метод планирования траектории движения схвата робота в среде с сорняками и культурными растениями, отличающийся разделением движений в горизонтальной и вертикальной плоскостях и на более 80% уменьшенным количеством промежуточных точек траектории, что снижает вычислительную нагрузку при расчетах в реальном времени.

Предложенные методы могут быть использованы при проектировании дельта-роботов сельскохозяйственного назначения для прополки различных культур. В дальнейшем авторы планируют рассмотреть задачу планирования комбинированного движения дельта-робота и платформы носителя [3], с целью повышения эффективности функционирования робота.

Авторы благодарны руководству ООО «Алькема-Элитное» (г. Краснодар) за консультативную и экспертную поддержку при подготовке данной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент US4976582. – URL: <https://patents.google.com/patent/US4976582A/en> (дата обращения: 05.11.2024.).
2. Роботы-пропольщики. – URL: <https://robotrends.ru/robopedia/propolki-robotizaciya> (дата обращения: 05.11.2024.).
3. Соловьев В.В., Номерчук А.Я., Филатов Р.К. Системный анализ наземной роботизированной платформы сельскохозяйственного назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 2 (238). – С. 69-82.
4. Соловьев В.В., Шадрин В.В., Номерчук А.Я., Филатов Р.К. Перспективы развития сельскохозяйственной робототехники в условиях импортозамещения // Матер. XIII Всероссийской Школы-семинара молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников «Исследования и творческие проекты для развития и освоения проблемных и прибрежно-шельфовых зон юга России», 18-20 мая 2022 г.
5. Распоряжение Правительства РФ от 29 декабря 2021 года № 3971-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отраслей агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/File/GetFile/0001202112310100?type=pdf> (дата обращения: 05.11.2024.).

6. *Bortoff S.A.* Object-Oriented Modeling and Control of Delta Robots // IEEE Conference on Control Technology and Applications. – 2018. – P. 251-258.
7. *Sachin K., Sudipto M.* Vision-based kinematic analysis of the Delta robot for object catching // *Robotica*. – 2021.
8. *Костин С.В., Шамраев А.А.* Синтез математической модели дельта-робота для использования в задачах сортировки твердых бытовых отходов // Матер. VIII Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (ИТНОП-2020). – 2020. – С. 209-213.
9. *Закиров Р.И., Алиев М.И., Морозов А.И.* Определение кинематических характеристик дельта-робота по заданным параметрам рабочей области // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-kinematicheskikh-harakteristik-delta-robota-po-zadannym-parametram-rabochey-oblasti> (дата обращения: 05.11.2024).
10. *Sai Z., Xinjun L., Bingkai Y., Xiangdong H., Jie B.* Dynamics Modeling of a Delta Robot with Telescopic Rod for Torque Feedforward Control // *Robotics*. – 2022. – 21 p.
11. *Sethia G., Kumar H., Guragol S., Sandhya S., Narasimha M.* Automated Computer Vision based Weed Removal Bot // IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). – 2020. – P. 1-6.
12. *Садиков М.Д., Тимофеев Г.А.* Моделирование движения дельта-робота по заданной траектории с целью определения силовых факторов, действующих на его приводы и шарниры // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 11. – С. 22-30.
13. *Robert L.* The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions // *Mechanical Engineering*. – Ohio University, 2016. – 46 p.
14. *Sanngoen W., Po-Ngaen W., Charitkhuan C., Doungjitjaroen K.* Development of Parallel Delta Robot System Controller Based on Raspberry Pi and FPGA // *Applied Mechanics and Materials*. – 2016. – P. 698-704.
15. *Васильев А.Н.* MATLAB. Самоучитель. Практический подход. – 2-е изд. – СПб.: Наука и Техника, 2015. – 448 с.
16. *Pshikhopov V., Medvedev M., Soloviev V.* Multi-mode control system of an unmanned vessel with fuzzy hybridization of controllers // 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019: 6, Paris, 23–26 апреля 2019 года. – Paris, 2019. – P. 1221-1226.
17. *Филлимонов А.Б., Филлимонов Н.Б.* Конструктивные аспекты метода потенциальных полей в мобильной робототехнике // Автоматрия. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 45-53.
18. *Медведев М.Ю., Лазарев В.С.* Алгоритм формирования траектории группы подвижных объектов в двумерной среде с использованием неустойчивых режимов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 3 (64). – С. 17-29.
19. *Алхаддад М., Миронов К.В., Дергачев С.А. [и др.]* Локальное планирование траектории колесного робота в ограниченной среде на основе модельного прогнозирующего управления // Робототехника и техническая кибернетика. – 2023. – Т. 11, № 3. – С. 205-214.
20. *Akima Hiroshi.* A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures // *J. ACM*. – 1970. – Vol. 17. – P. 589-602.

REFERENCES

1. Patent US4976582 [Patent US4976582]. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4976582A/en> (accessed 05 November 2024).
2. Roboty-propol'shchiki [Weeding robots]. Available at: <https://robotrends.ru/robopedia/propolki-robotizaciya> (accessed 05 November 2024).
3. *Solov'ev V.V., Nomerchuk A.Ya., Filatov R.K.* Sistemnyy analiz nazemnoy robotizirovannoy platformy sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Systems analysis of a ground-based robotic platform for agricultural purposes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2024, No. 2 (238), pp. 69-82.
4. *Solov'ev V.V., Shadrina V.V., Nomerchuk A.Ya., Filatov R.K.* Perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennoy robototekhniki v usloviyakh importozameshcheniya [Prospects for the development of agricultural robotics in the context of import substitution], *Mater. XIII Vserossiyskoy Shkoly-seminara molodykh uchennykh, aspirantov, studentov i shkol'nikov «Issledovaniya i tvorcheskie proekty dlya razvitiya i osvoeniya problemnykh i pribrezhno-shelf'ovykh zon yuga Rossii», 18-20 maya 2022 g* [Proceedings of the XIII All-Russian School-Seminar of Young Scientists, Postgraduates, Students and Schoolchildren "Research and Creative Projects for the Development and Exploitation of Problem and Coastal-Shelf Zones of the South of Russia", May 18-20, 2022].

5. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 29 dekabrya 2021 goda № 3971-r «Ob utverzhdenii strategicheskogo napravleniya v oblasti tsifrovoy transformatsii otrasley agropromyshlennogo i rybokhozyaystvennogo kompleksov Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda» [Order of the Government of the Russian Federation of December 29, 2021 No. 3971-r "On approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the sectors of the agro-industrial and fisheries complexes of the Russian Federation for the period up to 2030"]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/File/GetFile/0001202112310100?type=pdf> (accessed 05 November 2024).
6. Bortoff S.A. Object-Oriented Modeling and Control of Delta Robots, *IEEE Conference on Control Technology and Applications*, 2018, pp. 251-258.
7. Sachin K., Sudipto M. Vision-based kinematic analysis of the Delta robot for object catching, *Robotica*, 2021.
8. Kostin S.V., Shamraev A.A. Sintez matematicheskoy modeli del'ta-robota dlya ispol'zovaniya v zadachakh sortirovki tverdykh bytovykh otkhodov [Synthesis of a mathematical model of a delta robot for use in solid municipal waste sorting tasks], *Mater. VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i proizvodstve» (ITNOP-2020)* [Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference "Information Technologies in Science, Education and Production" (ITNOP-2020)], 2020, pp. 209-213.
9. Zakirov R.I., Aliev M.I., Morozov A.I. Opredelenie kinematcheskikh kharakteristik del'ta-robota po zadannym parametram rabochey oblasti [Determination of the kinematic characteristics of a delta robot based on the specified parameters of the working area], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and information complexes and systems], 2018, No. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-kinematcheskikh-harakteristik-delta-robota-po-zadannym-parametram-rabochey-oblasti> (accessed 05 November 2024).
10. Sai Z., Xinjun L., Bingkai Y., Xiangdong H., Jie B. Dynamics Modeling of a Delta Robot with Telescopic Rod for Torque Feedforward Control, *Robotics*, 2022, 21 p.
11. Sethia G., Kumar H., Guragol S., Sandhya S., Narasimha M. Automated Computer Vision based Weed Removal Bot, *IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, 2020, pp. 1-6.
12. Sadilov M.D., Timofeev G.A. Modelirovanie dvizheniya del'ta-robota po zadannoy traektorii s tsel'yu opredeleniya silovykh faktorov, deystviyushchikh na ego privody i sharniry [Modeling the motion of a delta robot along a given trajectory in order to determine the force factors acting on its drives and joints], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2021, No. 11, pp. 22-30.
13. Robert L. The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions, *Mechanical Engineering*. Ohio University, 2016, 46 p.
14. Sanngoen W., Po-Ngaen W., Charitkhuang C., Doungjitjaroen K. Development of Parallel Delta Robot System Controller Based on Raspberry Pi and FPGA, *Applied Mechanics and Materials*, 2016, pp. 698-704.
15. Vasil'ev A.N. MATLAB. Samouchitel'. Prakticheskiy podkhod [MATLAB. Self-instruction manual. Practical approach]. 2nd ed. Sant Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2015, 448 p.
16. Pshikhopov V., Medvedev M., Soloviev V. Multi-mode control system of an unmanned vessel with fuzzy hybridization of controllers, 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019: 6, Paris, 23–26 April 2019. Paris, 2019, pp. 1221-1226.
17. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Konstruktivnye aspekty metoda potentsial'nykh poley v mobil'noy robototekhnike [Constructive aspects of the potential field method in mobile robotics], *Avtometriya* [Avtometriya], 2021, Vol. 57, No. 4, pp. 45-53.
18. Medvedev M.Yu., Lazarev V.S. Algoritm formirovaniya traektorii gruppy podvizhnykh ob"ektov v dvumernoy srede s ispol'zovaniem neustoychivykh rezhimov [Algorithm for forming the trajectory of a group of moving objects in a two-dimensional environment using unstable modes], *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University], 2016, No. 3 (64), pp. 17-29.
19. Alkhaddad M., Mironov K.V., Dergachev S.A. [i dr.]. Lokal'noe planirovanie traektorii kolesnogo robota v ogranichennoy srede na osnove model'nogo prognoziryushchego upravleniya [Local trajectory planning of a wheeled robot in a limited environment based on model predictive control], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2023, Vol. 11, No. 3, pp. 205-214.
20. Akima Hiroshi. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures, *J. ACM*, 1970, Vol. 17, pp. 589-602.

Соловьев Виктор Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: vvsolovev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043438844; старший преподаватель кафедры систем автоматического управления; старший научный сотрудник КБ «АРК» ДГТУ.

Номерчук Александр Яковлевич – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; тел.: +79185945894; старший преподаватель кафедры систем автоматического управления.

Филатов Роман Константинович – КБ «АРК» ДГТУ; e-mail: r.k.filatov@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79996965820; к.т.н.; руководитель.

Soloviev Viktor Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: vvsolovev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043438844; senior lecturer the Department of Automatic Control Systems; senior researcher the CB “ARK” Don State Technical University;

Nomerchuk Alexandr Yakovlevich – e-mail: aynomerchuk@sfedu.ru; phone: +79185945894; senior lecturer the Department of Automatic Control Systems.

Filatov Roman Konstantinovich – CB “ARK” Don State Technical University; e-mail: r.k.filatov@gmail.com; Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.; supervisor.

УДК 519.872

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-113-121

А.А. Богнюков, Д.Ю. Зорькин, Е.Г. Шведов

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Основное внимание уделяется системам автоматизации, применяемым в автосалонах для продажи и ремонта автомобилей. Это требует учета не только существующих процессов, но и их оптимизации с использованием современных технологий, что усложняет анализ таких систем. Внедрение подобных решений может привести к созданию более эффективных моделей, соответствующих реальным условиям работы автосалонов. Понимание ключевых концепций автоматизации помогает не только структурировать исследование, но и определить направления для дальнейшего развития. Изучение существующих моделей и систем позволяет выявить лучшие практики и возможные недостатки. Сравнительный анализ помогает не только адаптировать проверенные решения к новым условиям, но и избежать ошибок, допущенных в предыдущих исследованиях. Системный анализ и моделирование систем массового обслуживания представляют собой ключевые аспекты в управлении и оптимизации бизнес-процессов, включая такие сложные области, как автоматизация процесса продаж и ремонта автомобилей. В современном мире высоких технологий, где конкуренция на рынке товаров и услуг постоянно растет, применение системного анализа позволяет предприятиям находить эффективные решения для улучшения своих операций. Системы массового обслуживания (далее СМО) являются центральным элементом в различных отраслях экономики, включая автосалоны и сервисные центры. Они направлены на оптимизацию потоков клиентов и ресурсов с целью повышения качества обслуживания и минимизации времени ожидания. Основная задача системного анализа в данном контексте заключается в изучении структуры, поведения и взаимодействия компонент системы для выявления слабых мест и поиска оптимальных стратегий их преодоления. Для автоматизации работы автосалона была выбрана предметная область, включающая ключевые элементы: персонал, клиенты, автомобили, услуги и договора. Эти элементы взаимосвязаны и образуют основу для проектируемой базы данных. Каждый из элементов имеет свою сущность, а их взаимодействие через договоры становится основой для разработки реляционной базы данных.

Автоматизация; продажа; ремонт; автосалон; CRM-система; ERP-система; оптимизация; процесс; автомобиль; услуга; договор купли-продажи; договор услуги.

A.A. Bognyukov, D.Yu. Zorkin, E.G. Shvedov

SYSTEM ANALYSIS AND MODELING OF QUEUE SYSTEMS

This article focuses on automation systems used in car dealerships for the sale and repair of vehicles. This requires consideration not only of existing processes but also their optimization using modern technologies, which complicates the analysis of such systems. The implementation of such solutions can

lead to the creation of more efficient models that reflect the real operating conditions of car dealerships. Understanding the key concepts of automation helps not only to structure the research but also to identify directions for further development. Studying existing models and systems allows for the identification of best practices and potential shortcomings. Comparative analysis helps not only to adapt proven solutions to new conditions but also to avoid mistakes made in previous studies. System analysis and modeling of queuing systems represent key aspects in the management and optimization of business processes, including such complex areas as automation of the sales and repair process of cars. In the modern world of high technology, where competition in the market of goods and services is constantly growing, the use of system analysis allows enterprises to find effective solutions to improve their operations. Queuing systems (hereinafter referred to as QMS) are a central element in various sectors of the economy, including car dealerships and service centers. They are aimed at optimizing customer flows and resources in order to improve the quality of service and minimize waiting times. The main task of system analysis in this context is to study the structure, behavior and interaction of system components in order to identify weaknesses and find optimal strategies to overcome them. To automate the work of the car dealership, a subject area was selected, including key elements: staff, customers, cars, services and contracts. These elements are interconnected and form the basis for the projected database. Each of the elements has its own essence, and their interaction through contracts becomes the basis for the development of a relational database.

Automation; sale; repair; car dealership; CRM system; ERP system; optimization; process; car; service; purchase and sale agreement; service agreement.

Введение. Система массового обслуживания представляет собой важный элемент в современном мире, особенно когда речь идет о решении однотипных задач, требующих многократного повторения. Такая система служит для упрощения и оптимизации процессов, что позволяет достигать высоких показателей эффективности и точности в различных отраслях. В частности, системы массового обслуживания находят широкое применение в процессе автоматизации рабочих процессов автосалонов [1, с.230]. Автосалоны как специфическая коммерческая структура требуют оптимизированного подхода к управлению множеством элементов – таких как персонал, клиенты, автомобили, услуги и договора [2, с.259]. Все эти элементы принято называть сущностями и каждая из них играет ключевую роль в успешной работе салона. Внедрение систем массового обслуживания здесь обусловлено необходимостью не только ускорения работы, но и повышения точности обработки данных [3, с.246]. Это позволяет минимизировать временные потери и уменьшить количество ошибок при взаимодействии между сущностями.

Процесс автоматизации работы автосалонов при помощи систем массового обслуживания базируется на четкой интеграции всех элементов системы [4, с.24]. Персонал получает возможность более эффективно управлять временем, распределяя его между важными задачами без лишних задержек. Клиенты ощущают повышение качества сервиса благодаря ускорению процессов оформления и получения услуг [5, с.96]. Автомобили как центральный объект деятельности салона становятся доступнее для управления благодаря точному учету всех параметров и характеристик в единой системе [6, с.123].

Услуги и договора также подпадают под влияние системы массового обслуживания: их оформление становится быстрее и проще, что исключает возможность ошибок при заполнении документов или потере данных [7, с.141]. Взаимосвязь между всеми этими сущностями обеспечивает целостность процесса и способствует общей оптимизации деятельности автосалона [8, с.247].

Постановка задачи. На рис. 1 показана информационная схема работы автосалона.

Для автоматизации работы автосалона были разработаны SQL-запросы, которые позволяют эффективно управлять данными. Примеры запросов включают:

1. Поиск автомобиля по году выпуска (запрос на основе таблицы Автомобиль, который позволяет найти автомобили, выпущенные в определённый год) [10, с.404];
2. Поиск сотрудников по стажу (запрос на основе таблицы Персонал, который выводит сотрудников с определённым стажем работы);
3. Поиск номеров договоров купли-продажи, заключённых в определённый промежуток дат (запрос, который позволяет отслеживать все заключённые сделки в указанном периоде) [11, с.2401].



Рис. 1. Информационная схема процесса работы автосалона [9, с.176]

Эти запросы направлены на ускорение обработки информации и улучшение взаимодействия с клиентами и персоналом.

Концептуальная схема должна отражать состав и взаимодействие объектов будущей базы данных. Для этой цели разработано несколько систем соглашений о представлении информации, содержащейся в базе данных. Например, универсальный язык моделирования (UML) – промышленный стандарт создания моделей процессов и данных для объектно-ориентированных разработок информационных систем (ИС) [12, с.1609].

Подобные системы предназначены для автоматизации всего процесса разработки ИС.

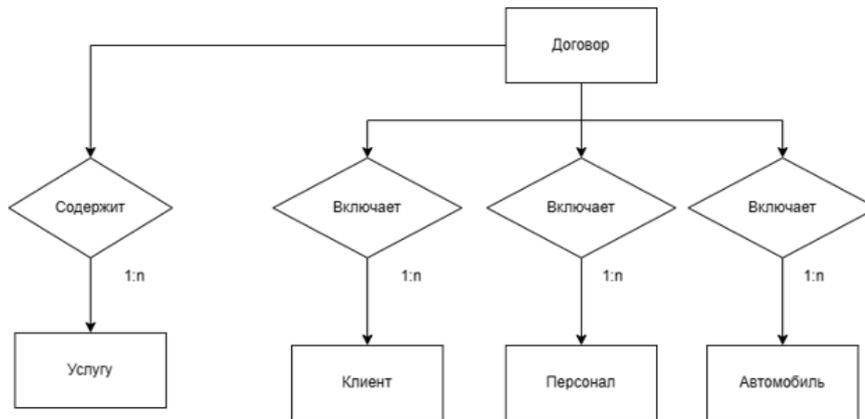


Рис. 2. Концептуальная схема автосалона [13, с.187]

Логическое проектирование основано на модели логического уровня и представляет собой описание и построение схем связей между элементами данных безотносительно к их содержанию и среде хранения. Логическая структура БД получается преобразованием концептуальной схемы в логическую схему (модель), ориентированную на выбранную СУБД [14, с.103]. Применительно к наиболее распространенной реляционной модели данных общий подход преобразования концептуальной схемы в логическую состоит в том, что каждую сущность, являющуюся представителем множества однотипных объектов, задают схемой отдельного отношения (таблицы), а атрибуты сущности образуют столбцы таблицы [15, с.8].

Первичный ключ сущности образует исходный первичный ключ таблицы, который в дальнейшем может быть изменен [16, с.35]. Проектирование логической структуры БД должно решать задачи выбора наиболее эффективной структуры данных, обеспечения быстрого доступа к данным; исключения дублирования данных, обеспечения целостности данных таким образом, чтобы при изменении одних объектов автоматически происходило соответствующее изменение связанных с ними объектов [17, с.48]. При непра-

вильно спроектированной схеме БД могут возникнуть аномалии модификации данных. Они обусловлены отсутствием средств явного представления типов множественных связей между объектами ПО и неразвитостью средств описания ограничений целостности на уровне модели данных [18, с.3117].

Процесс проектирования базы данных для автосалона начинается с анализа требований и построения информационной схемы [19, с.152]. На этом этапе было определено, какие процессы необходимо автоматизировать: поиск автомобилей по году выпуска, учет клиентов, управление договорами и услугами. Для этого были созданы схемы задач, отражающие взаимодействие различных объектов системы.

Проектирование реляционной базы данных начинается с создания концептуальной схемы. Эта схема включает сущности: Персонал, Клиент, Автомобиль, Услуга, Договор покупки и Договор услуги. Каждая сущность содержит определённые атрибуты, такие как фамилия, имя, должность для персонала или код автомобиля, VIN-номер и стоимость для автомобилей. В результате автором была создана реляционная модель, включающая таблицы с первичными ключами и внешними связями [20, с.139]. Так, Код сотрудника ссылается на таблицу Персонал, а Код автомобиля ссылается на таблицу Автомобиль.

Модель базы данных включает следующие ключевые элементы:



Рис. 3. Элементы базы данных [20, с.140]

На рис. 4. автором представлена схема отношений БД.

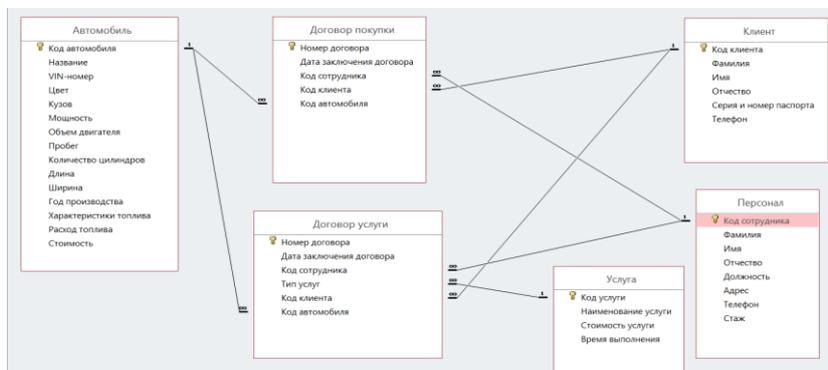


Рис. 4. Схема отношений БД

Для автоматизации работы автосалона были разработаны SQL-запросы, которые позволяют эффективно управлять данными. Запросы направлены на ускорение обработки информации и улучшение взаимодействия с клиентами и персоналом. Автор представил примеры запросов на рис. 5–7.

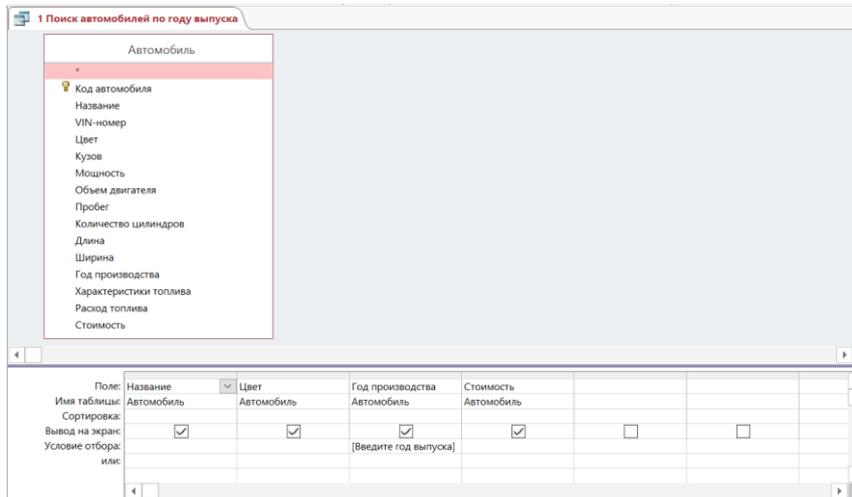


Рис. 5. Запрос «Найти автомобиль по году выпуска»

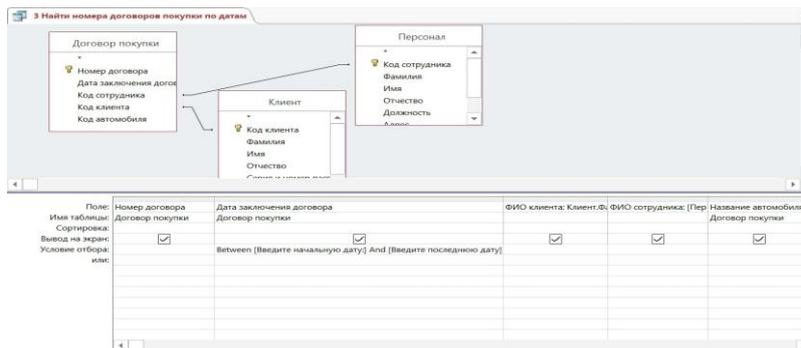


Рис. 6. Запрос «Найти номера договоров покупки, заключенные в промежутке»

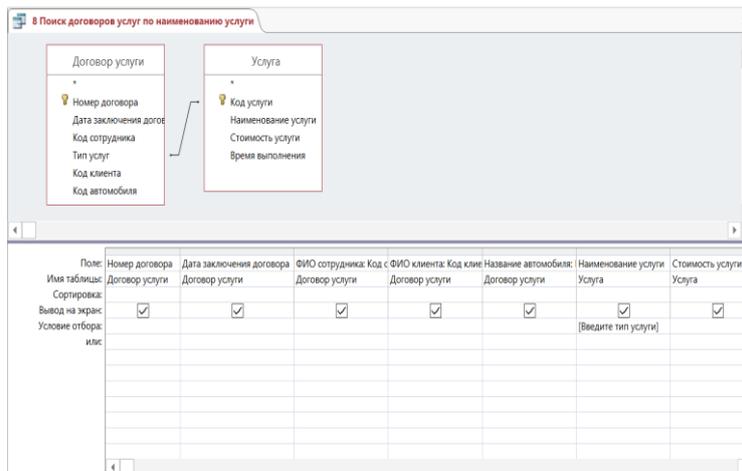


Рис. 7. Запрос «Найти договора услуг по наименованию услуги»

В результате процесса разработки базы данных автором был проведен анализ получившихся отношений с помощью функциональных зависимостей (рис. 8).

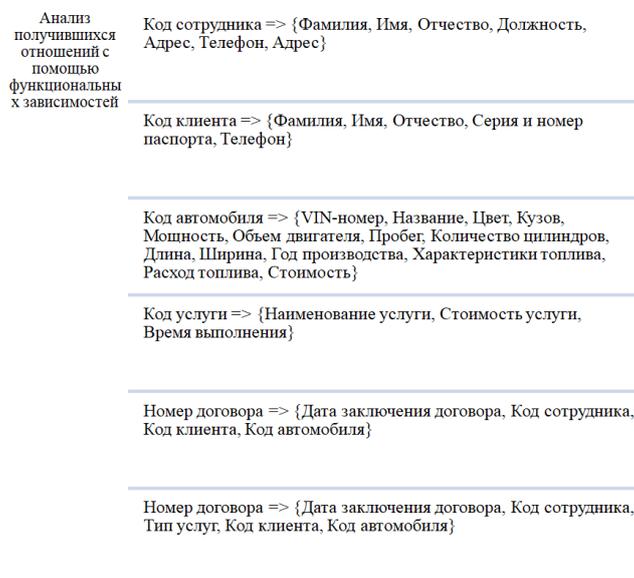


Рис. 8. Анализ получившихся отношений с помощью функциональных зависимостей

В процессе проектирования была проведена проверка на нормальные формы (1НФ, 2НФ, 3НФ). Все таблицы были проанализированы на предмет избыточности и аномалий данных. В результате (рис. 9).



Рис. 9. Проверка нормальных форм

Это гарантирует, что база данных будет эффективной и не будет содержать избыточных данных, что улучшает её производительность.

Выводы. В результате проведённой работы была разработана реляционная база данных для автосалона, которая позволяет автоматизировать процессы продаж, обслуживания клиентов и управления договорами. В процессе проектирования были использованы методы нормализации данных, что обеспечило минимизацию избыточности и повышенную эффективность работы базы данных. Разработанная система позволяет улучшить организацию работы автосалона, ускорить процессы обработки информации и повысить качество обслуживания клиентов. В дальнейшем можно внедрять дополнительные функциональные возможности, такие как анализ продаж, управление складом и интеграция с другими бизнес-процессами автосалона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анисимова Г.Б., Фролов Р.А. Разработка информационной системы автоматизации деятельности автосалона // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 5 (89). – С. 223-230.
2. Арханчева М.В., Трипкош В.А., Акимов С.С. Инфологическое моделирование базы данных для организации // Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности. – 2023. – С. 259-262.

3. *Беляева И.А., Козловский В.Н., Васин С.А.* Инструменты моделирования в обеспечении качества новых конструкций автомобилей в процессе проектирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 246-250.
4. *Бибик Я.Н.* Жизненный цикл приложения баз данных // Сб. научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2023. – № 70. – С. 24-30.
5. *Ежова Г.П.* Задачи систем автоматизированного проектирования технологических процессов обработки деталей ГТД // Инновационные научные исследования в современном мире: теория, методология, практика. – 2023. – С. 96-100.
6. *Ермакова Е.И., Пьянкова Н.Г.* Математические методы в маркетинговой деятельности автодилеров // Математическое моделирование и информационные технологии при исследовании явлений и процессов в различных сферах деятельности. – 2023. – С. 123-128.
7. *Загидуллина Э.Г.* Проектирование системы сбора данных // Инновационные научные исследования 2023: естественные и технические науки: Сб. материалов XXVI-ой международной очно-заочной научно-практической конференции, 19 апреля, 2023. – М.: Изд-во НИЦ «Империя», 2023. – С. 58.
8. *Игнатьева В.М., Таренко Л.Б.* Базы данных и их применение в сфере автосервиса // Общество, государство, личность: молодёжное предпринимательство в поведенческой экономике. – 2020. – С. 247-251.
9. *Ишмаева В.З.* Технологии цифровой трансформации автобизнеса // Современные подходы к трансформации концепций государственного регулирования и управления в социально-экономических системах. – 2022. – С. 174-178.
10. *Кириллов В.С., Кондратьев В.Ю.* Применение системы Agile для проектирования и разработки информационных систем // Ц75 Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты: сборник материалов V всероссийской научно-практической конференции. – Краснодар: КубГАУ, 2023. – С. 404.
11. *Кузниченко М.А.* Выбор СУБД в учебном процессе подготовки специалистов среднего звена // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. – 2023. – С. 2401-2404.
12. *Куракин С.З., Онуфрей А.Ю., Разумов А.В.* Исследование вариантов построения информационно-управляющих систем на основе сетевых моделей систем массового обслуживания // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 6. – С. 1609-1642.
13. *Новикова Н.В.* Жизненный цикл информационной системы базы данных // Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития. – 2023. – С. 187-192.
14. *Серик М.С., Копыльцов А.В., Жумагулова С.К.* Технология разработки приложений с использованием баз данных // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. – 2023. – С. 103-105.
15. *Стукало Р.Е., Сафин М.А.* Эффективная организация баз данных в промышленных системах // Проблемы современной науки и образования. – 2024. – № 1 (188). – С. 7-10.
16. *Урмашев Н.А., Сакен Г.* Проектирование и реализация Web-приложения для автоматизации автосалона // Национальная ассоциация ученых. – 2022. – № 81. – С. 35-36.
17. *Хорошев Е.В., Гусева В.В.* Создание базы данных для автосалона // Научные перспективы-2023. – 2023. – С. 48-49.
18. *Шаповалов А.А., Суворова А.В.* Эволюция бизнес-процессов в российском авторитейле // Экономика. – 2024. – Т. 14, № 6. – С. 3117-3134.
19. *Шарафиева Н.Х., Мурзин С.З.* Информационные системы и базы данных: организация, хранение и управление информацией // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации. – 2023. – С. 150-154.
20. *Шаталова Ю.Г., Жиглов Я.В.* Разработка системы репликации для распределенной базы данных предприятия // Символ науки. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 137-141.

REFERENCES

1. *Anisimova G.B., Frolov R.A.* Razrabotka informatsionnoy sistemy avtomatizatsii deyatelnosti avtosalona [Development of an information system for automating the activities of a car dealership], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2022, No. 5 (89), pp. 223-230.
2. *Arkharcheva M.V., Tripkosh V.A., Akimov S.S.* Infologicheskoe modelirovanie bazy dannykh dlya organizatsii [Infological modeling of a database for an organization], *Vyzovy sovremennosti i strategii razvitiya obshchestva v usloviyakh novoy real'nosti* [Challenges of our time and strategies for the development of society in the context of a new reality], 2023, pp. 259-262.

3. Belyaeva I.A., Kozlovskiy V.N., Vasin S.A. Instrumenty modelirovaniya v obespechenii kachestva novykh konstruktsey avtomobiley v protsesse proektirovaniya [Modeling tools in ensuring the quality of new car designs during the design process], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2024, No. 1, pp. 246-250.
4. Bibik Ya.N. Zhiznennyi tsikl prilozheniya baz dannykh [ife cycle of database applications], *Sb. nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport], 2023, No. 70, pp. 24-30.
5. Ezhova G.P. Zadachi sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov obrabotki detaley GTD [Tasks of automated design systems for technological processes of processing gas turbine engine parts], *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire: teoriya, metodologiya, praktika* [Innovative scientific research in the modern world: theory, methodology, practice], 2023, pp. 96-100.
6. Ermakova E.I., P'yankova N.G. Matematicheskie metody v marketingovoy deyatel'nosti avtodilerov [Mathematical methods in the marketing activities of car dealers], *Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii pri issledovanii yavleniy i protsessov v razlichnykh sferakh deyatel'nosti* [Mathematical modeling and information technology in the study of phenomena and processes in various fields of activity], 2023, pp. 123-128.
7. Zagidullina E.G. Proektirovanie sistemy sbora dannykh [Design of a data collection system], *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya 2023: estestvennye i tekhnicheskie nauki: Sb. materialov XXVI-oy mezhdunarodnoy ochno-zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 19 aprelya, 2023* [Innovative scientific research 2023: natural and technical sciences: Collection of materials of the XXVI-th international in-person and correspondence scientific and practical conference, April 19, 2023]. Moscow: Izd-vo NITS «Imperiya», 2023, pp. 58.
8. Ignat'eva V.M., Tarenko L.B. Bazy dannykh i ikh primenenie v sfere avtoservisa [Databases and their application in the field of car service], *Obshchestvo, gosudarstvo, lichnost': molodezhnoe predprinimatel'stvo v povedencheskoy ekonomike* [Society, state, personality: youth entrepreneurship in behavioral economics], 2020, pp. 247-251.
9. Ishmaeva V.Z. Tekhnologii tsifrovoy transformatsii avtobiznesa [Technologies of digital transformation of the auto business], *Sovremennye podkhody k transformatsii kontseptsiy gosudarstvennogo regulirovaniya i upravleniya v sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh* [Modern approaches to the transformation of concepts of state regulation and management in socio-economic systems], 2022, pp. 174-178.
10. Kirillov V.S., Kondrat'ev V.Yu. Primenenie sistemy Agile dlya proektirovaniya i razrabotki informatsionnykh sistem [Application of the Agile system for the design and development of information systems], *TS75 TSifrovizatsiya ekonomiki: napravleniya, metody, instrumenty: sbornik materialov V vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [C75 Digitalization of the economy: directions, methods, tools: collection of materials of the V all-Russian scientific and practical conference]. Krasnodar: KubGAU, 2023, pp. 404.
11. Kuznichenko M.A. Vybory SUBD v uchebnom protsesse podgotovki spetsialistov srednego zvena [Selection of DBMS in the educational process of training mid-level specialists], *Universitetskiy kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury* [University complex as a regional center of education, science and culture], 2023, pp. 2401-2404.
12. Kurakin S.Z., Onufrey A.Yu., Razumov A.V. Issledovanie variantov postroeniya informatsionno-upravlyayushchikh sistem na osnove setevykh modeley sistem massovogo obsluzhivaniya [Research of options for constructing information and control systems based on network models of queuing systems], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2024, Vol. 23, No. 6, pp. 1609-1642.
13. Novikova N.V. Zhiznennyi tsikl informatsionnoy sistemy bazy dannykh [Life cycle of the information database system], *Perspektivnye nauchnye issledovaniya: opyt, problemy i perspektivy razvitiya* [Advanced scientific research: experience, problems and development prospects], 2023, pp. 187-192.
14. Serik M.S., Kopyl'tsov A.V., Zhumagulova S.K. Tekhnologiya razrabotki prilozheniy s ispol'zovaniem baz dannykh [Technology of developing applications using databases], *Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem* [Modeling and situational quality management of complex systems], 2023, pp. 103-105.
15. Stukalo R.E., Safin M.A. Effektivnaya organizatsiya baz dannykh v promyshlennykh sistemakh [Efficient organization of databases in industrial systems], *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Problems of modern science and education], 2024, No. 1 (188), pp. 7-10.
16. Urmashev N.A., Saken G. Proektirovanie i realizatsiya Web-prilozheniya dlya avtomatizatsii avtosalona [Design and implementation of a Web application for automating a car dealership], *Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh* [National Association of Scientists], 2022, No. 81, pp. 35-36.

17. Khoroshev E.V., Guseva V.V. Sozdanie bazy dannykh dlya avtosalona [Creation of a database for a car dealership], *Nauchnye perspektivy-2023* [Scientific prospects-2023], 2023, pp. 48-49.
18. Shapovalov A.A., Suvorova A.V. Evolyutsiya biznes-protsessov v rossiyskom avtoriteyle [Evolution of business processes in Russian auto retail], *Ekonomika* [Economy], 2024, Vol. 14, No. 6, pp. 3117-3134.
19. Sharafieva N.Kh., Murzin S.Z. Informatsionnye sistemy i bazy dannykh: organizatsiya, khranenie i upravlenie informatsiy [Information systems and databases: organization, storage and management of information], *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epokhu tsifrovizatsii* [Modern trends in the development of science and the world community in the era of digitalization], 2023, pp. 150-154.
20. Shatalova Yu.G., Zhiglov Ya.V. Razrabotka sistemy replikatsii dlya raspredelennoy bazy dannykh predpriyatiya [Development of a replication system for a distributed enterprise database], *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2019, Vol. 2, No. 3, pp. 137-141.

Богнюков Александр Алексеевич – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: bognyukovv@gmail.com; г. Волгоград, Россия; студент.

Зорькин Дмитрий Юрьевич – e-mail: mosh285@gmail.com; кафедра ПМ; преподаватель.

Шведов Евгений Геннадьевич – e-mail: esheg@rambler.ru; кафедра ПМ; к.ф.-м.н.; доцент.

Bognyukov Alexander Alekseevich – Volgograd State Technical University; e-mail: bognyukovv@gmail.com; Volgograd, Russia; the Department of Applied Mathematics; student.

Zorkin Dmitry Yuryevich – e-mail: mosh285@gmail.com; the Department of Applied Mathematics; teacher.

Shvedov Evgeny Gennadievich – e-mail: esheg@rambler.ru; the Department of Applied Mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

УДК 004:681.518

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-121-131

М.А. Георгиева, И.М. Першин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ГИДРОЛИТОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Данная статья посвящена исследованию влияния атмосферных осадков на гидролитосферные процессы с использованием математического моделирования. Гидролитосферные процессы включают взаимодействие между водой, атмосферой и земной корой, играя важную роль в формировании ландшафта, круговороте воды и климате Земли. Используя исторические данные об осадках и гидролитосферных процессах, авторы калибруют и проверяют свою модель. Результаты показывают, что модель может точно предсказывать изменения в стоке воды, эрозии почвы и качестве воды в ответ на изменения в режиме осадков. В работе представлена разработка и применение математических моделей для изучения влияния осадков на формирование стока, эрозию почвы, изменение уровня грунтовых вод, а также на геоморфологические процессы, происходящие в гидролитосфере. В статье анализируются различные типы моделей, включая: – модели поверхностного стока, которые описывают формирование и движение стока по поверхности земли; – модели эрозии почвы, которые предсказывают интенсивность эрозионных процессов, обусловленных воздействием атмосферных осадков; – модели грунтовых вод, которые изучают влияние осадков на уровень грунтовых вод и их движение в подземных горизонтах; – модели геоморфологических процессов, которые исследуют влияние осадков на формирование рельефа, образование оврагов, склонов и других геоморфологических элементов. Были рассмотрены и изучены проблемы валидации и калибровки моделей, а также факторы неопределенности, связанные с вариабельностью атмосферных осадков. Результаты исследования позволяют лучше понять взаимодействие атмосферных осадков с гидролитосферой и представить возможности использования математического моделирования для прогнозирования гидролитосферных процессов и разработки стратегий управления водными ресурсами. Статья имеет важное значение для понимания и управления гидролитосферными процессами в условиях изменяющегося климата. Математическая модель, разработанная в статье, может быть использована для оценки потенциальных последствий изменения количества и характера осадков, а также для разработки стратегий адаптации для смягчения этих последствий.

Гидролитосферные процессы; атмосферные осадки; математическое моделирование; грунтовые воды; эрозионные процессы.

M.A. Georgieva, I.M. Pershin

MATHEMATICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION ON HYDROLITHOSPHERIC PROCESSES

This article is devoted to the study of the influence of atmospheric precipitation on hydrolithospheric processes using mathematical modeling. Hydrolithospheric processes involve interactions between water, the atmosphere, and the Earth's crust, playing an important role in shaping the landscape, water cycle, and Earth's climate. Using historical data on precipitation and hydrolithospheric processes, the authors calibrate and validate their model. Results show that the model can accurately predict changes in water flow, soil erosion, and water quality in response to changes in the precipitation regime. This paper presents the development and application of mathematical models to study the effects of precipitation on runoff generation, soil erosion, water table changes, and geomorphologic processes occurring in the hydrolithosphere. The paper analyzes different types of models, including: – surface runoff models, which describe the formation and movement of runoff over the land surface; – soil erosion models, which predict the intensity of erosion processes caused by precipitation; – groundwater models, which study the effect of precipitation on the water table and its movement in groundwater aquifers; – models of geomorphologic processes, which study the influence of precipitation on the formation of relief, formation of ravines, slopes and other geomorphologic elements. Problems of model validation and calibration, as well as uncertainties associated with precipitation variability, were considered and studied. The results of the study provide a better understanding of the interaction of precipitation with the hydrolithosphere and present opportunities for using mathematical modeling to predict hydrolithospheric processes and develop water management strategies. The article has important implications for understanding and managing hydrolithospheric processes in a changing climate. The mathematical model developed in the article can be used to assess the potential impacts of changing precipitation amounts and patterns, and to develop adaptation strategies to mitigate these impacts.

Hydrolithospheric processes, precipitation, mathematical modeling, groundwater, erosion processes.

Введение. Атмосферные осадки играют ключевую роль в формировании и функционировании гидролитосферных процессов, то есть взаимодействия воды и горных пород, это:

- ◆ пополнение подземных вод, то есть дождевая вода просачивается в почву и пополняет водоносные горизонты;
- ◆ регулирование стока, когда осадки влияют на речной сток, вызывая паводки и наводнения в период интенсивных дождей;
- ◆ эрозия и денудация, когда дождевые воды вызывают эрозию почвы и горных пород, перенося материал в речные системы и моря;
- ◆ растворение и выветривание, когда дождевая вода может растворять горные породы, вызывая их выветривание и образование карстовых пещер и провалов;
- ◆ формирование грунтовых вод, т.е. осадки влияют на уровень грунтовых вод, повышая его в период дождей и снижая в период засухи.

Влияние осадков на гидролитосферные процессы зависит от:

- ◆ типа почвы и рельефа, так как проницаемость почвы и уклон рельефа влияют на скорость инфильтрации воды и ее сток;
- ◆ человеческой деятельности, такая как вырубка лесов, строительство гидротехнических сооружений и загрязнение водных ресурсов [4–6].

Интенсивные ливни могут вызывать резкое повышение уровня рек и наводнения, в то время как продолжительные дожди могут вызывать повышение уровня грунтовых вод и активизацию эрозионных процессов.

Как известно, интенсивность осадков (I) измеряется в мм/час, и подразделяется на следующие: слабый дождь (1–5) мм/час; умеренный дождь (5–20) мм/час; сильный дождь (20–40) мм/час; ливень (более 40) мм/час.

Методика моделирования эрозионно-руслowych процессов

1. Математические модели. Рассмотрим математические модели взаимодействия осадков и грунтовых вод:

1. Осадки выпадают на ровную плоскую поверхность (рис. 1).

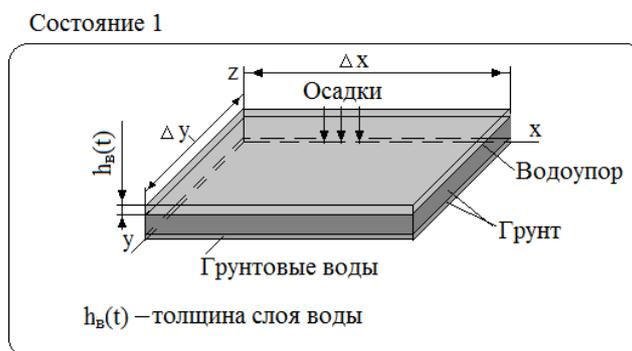


Рис. 1. Схема выпадения осадков

1.1. Полагая, что через боковые грани и поверхностный слой грунта не происходит отток воды, уровень слоя воды на поверхности грунта (h_B), за время τ , записывается в виде:

$$h_B = I \cdot \tau. \quad (1)$$

1.2. Если через поверхностный слой осуществляется перетекание воды в грунт (коэффициент перетекания b_n), то математическая модель процесса записывается в виде:

$$\begin{aligned} h_b(x, y, L_z, \tau) &= h_g(x, y, L_z, \tau) + b_n \cdot (h_1(x, y, 0, \tau) - h_g(x, y, L_z, \tau)) \cdot \partial \tau, \\ h_1(x, y, 0, \tau) &= h_1(x, y, 0, \tau) - b_n \cdot (h_1(x, y, 0, \tau) - h_g(x, y, L_z, \tau)) \cdot \partial \tau. \end{aligned} \quad (2)$$

В соответствии с [1–3], запишем уравнения, описывающие рассматриваемый гидролитосферный процесс, в безнапорном, однородном пласте (грунтовых водах):

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= k_{1,x} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial z^2}, \\ k_{1,x} &= \bar{K}_x \cdot h_{cp} / \mu, \quad k_{1,y} = \bar{K}_y \cdot h_{cp} / \mu, \quad k_{1,z} = \bar{K}_z \cdot h_{cp} / \mu, \\ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z. \end{aligned} \quad (3)$$

где x, y, z – пространственные координаты; τ – время; h_1 – напор в горизонте грунтовых вод; $k_{1,x}, k_{1,y}, k_{1,z}$ – коэффициенты уровнепроводности по соответствующим координатам в $m^2/сут$; $\bar{K}_x, \bar{K}_y, \bar{K}_z$ – коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам; h_{cp} – средний уровень грунтовых вод; μ – коэффициент грунтовой водоотдачи; L_x, L_y, L_z – заданные значения.

2. Дискретные модели. Дискретная модель, описывающая процесс в однородном безнапорном пласте, может быть представлена в виде [17–20]:

Верхняя граница грунтовых вод

$$\begin{aligned} h_{B,\eta,\gamma} &= h_{B,\eta,\gamma} + b_n \cdot (h_{1,\eta,\gamma,1} - h_{B,\eta,\gamma}) \cdot \Delta \tau, \\ h_{1,\eta,\gamma,1} &= h_{1,\eta,\gamma,1} - b_n \cdot (h_{1,\eta,\gamma,1} - h_{B,\eta,\gamma}) \cdot \Delta \tau, \\ 2 < \eta < N_x - 1; 2 < \gamma < N_y - 1. \end{aligned} \quad (4)$$

Грунтовые воды

$$\begin{aligned} \frac{\Delta h_{1,\eta,\gamma,\xi}}{\Delta \tau} = & k_{1,x} \frac{h_{1,\eta-1,\gamma,\xi} - 2 \cdot h_{1,\eta,\gamma,\xi} + h_{1,\eta+1,\gamma,\xi}}{(\Delta x)^2} + \\ & + k_{1,y} \frac{h_{1,\eta,\gamma-1,\xi} - 2 \cdot h_{1,\eta,\gamma,\xi} + h_{1,\eta,\gamma+1,\xi}}{(\Delta y)^2} + \\ & + k_{1,z} \frac{h_{1,\eta,\gamma,\xi-1} - 2 \cdot h_{1,\eta,\gamma,\xi} + h_{1,\eta,\gamma,\xi+1}}{(\Delta z_1)^2}; \end{aligned} \tag{5}$$

$$2 < \eta < N_x - 1; \quad 2 < \gamma < N_y - 1; \quad 2 < \xi < N_{z1} - 1$$

На нижней границе грунтовых вод полагаем, что перетекание отсутствует:

$$h_{1,\eta,\gamma,N_z} = h_{1,\eta,\gamma,N_z-1}, \quad 2 < \eta < N_x - 1; \quad 2 < \gamma < N_y - 1.$$

где $b_{п}$ – коэффициент перетекания; h_1 – уровень грунтовых вод; h_b – уровень воды на поверхности.

3. Методика моделирования процессов при выпадении осадков. Осадки выпадают на наклонную плоскость (рис. 2)

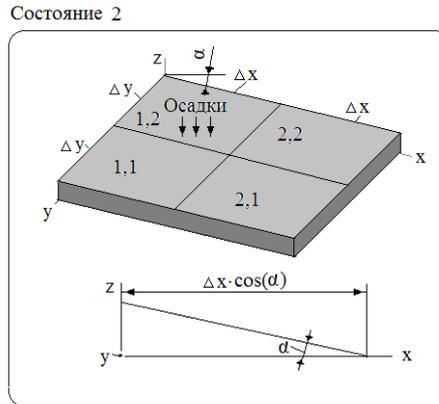


Рис. 2. Схема выпадения осадков на наклонную плоскость

Разделим наклонную плоскость на секции (см. рис.2). При наклоне поверхности водной поток, со скоростью $V(\alpha)$, перетекает в направлении оси x от одной плоскости к другой (например, поток с секции 1.1 перетекает на секцию 2.1 и т.д. Определим время, за которое вода с секции 1.1 полностью перетечет на секцию 2.1 τ

$$t_{п} = \Delta x / v(\alpha). \tag{6}$$

За время $\Delta \tau$ коэффициент перетекания составит:

$$k_p = (\Delta x / v(\alpha)) \cdot \Delta \tau, \quad (k_p \leq 1). \tag{7}$$

Коэффициент перетекания для η,γ секции, при изменении скорости потока $v_{\eta,\gamma}$, вызванной изменением угла наклона секции $\alpha = \alpha_{\eta,\gamma}$, записывается в виде:

$$\begin{aligned} k_{p,\eta,\gamma} = & (\Delta x / v_{\eta,\gamma}(\alpha_{\eta,\gamma})) \cdot \Delta \tau, \quad (k_{p,\eta,\gamma} \leq 1), \\ & 1 < \eta < N_x; \quad 1 < \gamma < N_y. \end{aligned}$$

Полагая в начальный момент $\tau=0$, запишем текущее время: $\tau=\tau+\Delta\tau$.

3.1. Уровень слоя воды, в квадрате $\Delta x \cdot \Delta y$, без учета перетекания, за время τ , определяется из следующего соотношения:

$$h_{в,\eta,\gamma} = I \cdot (\Delta x \cdot \cos(\alpha_{\eta,\gamma}) \cdot \Delta y) \cdot \tau / (\Delta x \cdot \Delta y) = I \cdot \cos(\alpha_{\eta,\gamma}) \cdot \tau, \quad (8)$$

$$1 < \eta < N_x; 1 < \gamma < N_y$$

Перетекание уровня слоя воды за время $\Delta\tau$ составит:

$$h_{вр,\eta,\gamma} = I \cdot \cos(\alpha_{\eta,\gamma}) \cdot \Delta\tau \cdot k_{р,\eta,\gamma} \quad (9)$$

$$1 < \eta < N_x; 1 < \gamma < N_y$$

3.2. Уровень слоя воды в секциях, с учетом перетекания за время $\Delta\tau$, определяется из соотношений:

$$h_{в,\eta,\gamma} = I \cdot \cos(\alpha_{\eta,\gamma}) \cdot \Delta\tau - h_{вр,\eta,\gamma}, \quad (10)$$

$$1 < \eta < N_x; 1 < \gamma < N_y.$$

3.3. Рассмотрим случай, когда перетекание осуществляется из верхних секций в секции, которые расположены «ниже». Определим уровень слоя воды в «нижних» секциях $h_{вн,\eta,\gamma}$:

$$h_{вн,\eta,\gamma} = h_{вр,\eta,\gamma} + h_{вр,\eta-1,\gamma}, \quad (11)$$

$$2 < \eta < N_x; 1 < \gamma < N_y.$$

3.4. Если через поверхностный слой осуществляется перетекание воды в грунт, то к математической модели, рассмотренной выше, следует добавить уравнения (1)–(4), описывающие процесс в грунтовых водах.

Моделирование гидrolитосферных процессов. Рассмотрим пример моделирования эрозионных процессов. Схема рассматриваемого объекта приведена на рис. 3.

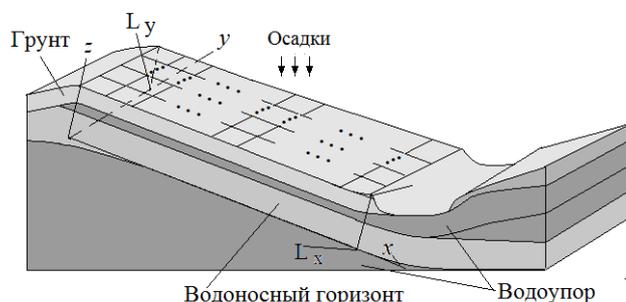


Рис. 3. Схема моделирования эрозионных процессов

Геометрические параметры моделируемой области приведены в табл. 1 (значения параметров заданы в системе СИ)

Таблица 1

Значения геометрических параметров объекта

	Обозначения	Размер, м.
Длина моделируемой области	L_x	100
Ширина моделируемой области	L_y	100
Толщина грунта	L_z	0.5
Высота грунтовых вод		0.0 м.

Интенсивность осадков $I=0.05/3600$ м./сек.

Численные значения физических параметров, при моделировании рассмотренных выше процессов приведены в табл.2.

где k_x, k_y, k_z – коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам;

b_n – коэффициент перетекания (значения параметров приведены в системе «СИ»).

Число точек дискретизации по пространственным координатам x, y, z : $N_x=70$; $N_y=50$; $N_z=9$;

Шаги дискретизации по пространственным координатам соответственно равны:

$$dx:= L_x/(N_x-1); dy:= L_y/(N_y-1); dz:= L_z/(N_z-1).$$

Значения физических параметров объекта приведены в табл. 2

Таблица 2

Значения физических параметров грунтовых вод

Грунтовые воды
$k_{x1}=3.92/86400$; $k_{y1}=3.92/86400$; $k_{z1}=2.52/86400$; $b_n=0.006$;

1. Используя приведенные выше математические модели, была составлена программа вычисления изменения уровня, при выпадении осадков (интенсивности $I=0.05/3600$) на ровную плоскую поверхность. При моделировании полагали, что через боковые грани и поверхностный слой грунта не происходит отток воды. На рис. 4 показаны графики изменения уровня в двух выбранных точках [4].

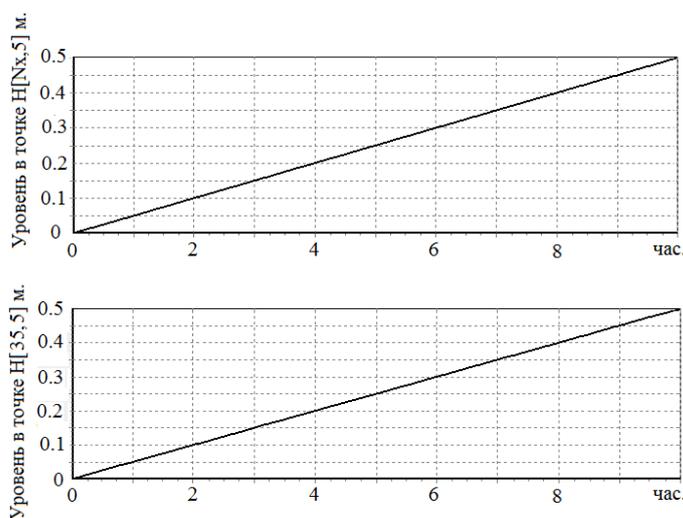


Рис. 4. Графики изменения уровня в выбранных точках

2. Используя приведенные выше математические модели, была составлена программа вычисления изменения уровня, при выпадении осадков (интенсивности I) на наклонную поверхность. При моделировании полагали, что через боковые грани и поверхностный слой грунта не происходит отток воды. Скорость течения потока воды принималась равной: $V_{\eta,\gamma}(\alpha)=0.005$ м./с. В рассматриваемом случае будем полагать, что угол наклона $\alpha_{\eta,\gamma}=15^\circ$. На рис. 5 показаны графики изменения уровня в двух выбранных точках.

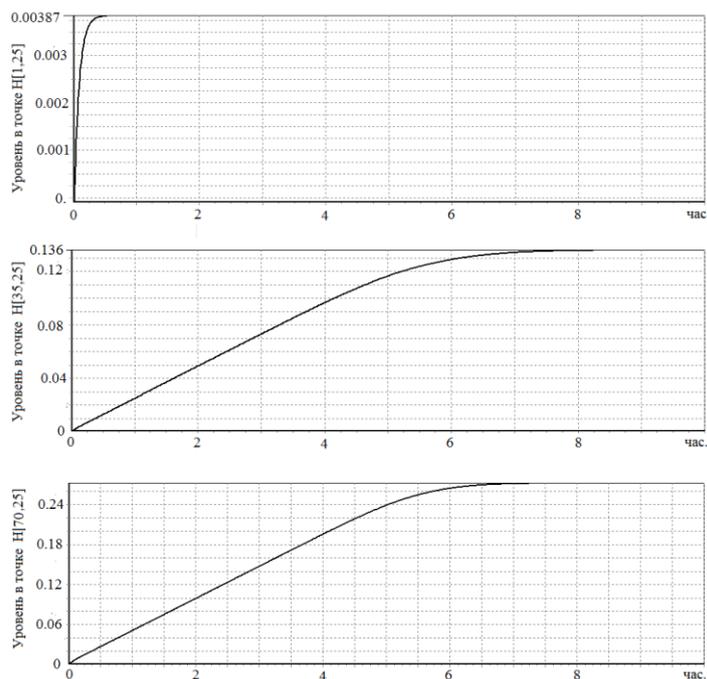


Рис. 5. Графики изменения уровня в выбранных точках, при наличии скорости течения водного потока

3. По результатам моделирования гидrolитосферных процессов, с учетом скорости течения. потока воды $V_{п,г}(\alpha)=0.005$ м./с. и перетекания воды в грунт, построены графики, приведенные на рис. 6.

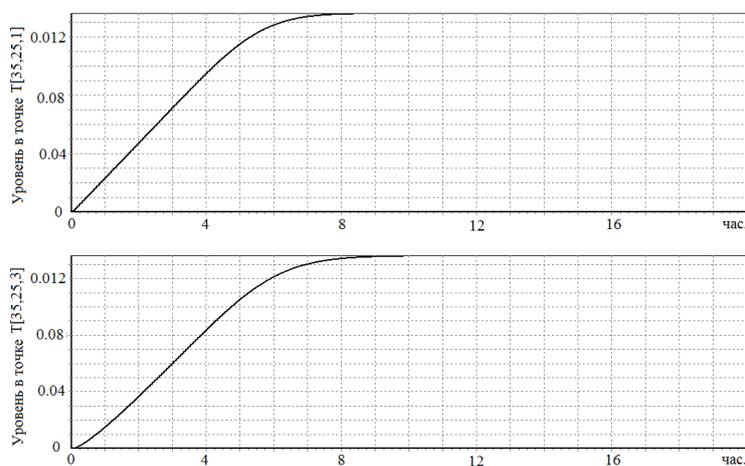


Рис. 6. Графики изменения уровня грунтовых вод, при наличии скорости течения водного потока

Заключение. Атмосферные осадки являются ключевым фактором, определяющим динамику гидrolитосферных процессов, то есть взаимодействия воды и горных пород. Изменения климата и увеличение частоты и интенсивности осадков в некоторых регионах могут привести к усилению эрозии и повышению риска наводнений.

Изучение гидrolитосферных процессов, то есть взаимодействия воды и горных пород, требует использования математического моделирования, чтобы понять сложные взаимосвязи и предсказать их будущее развитие.

Математическое моделирование позволяет учитывать множество факторов, влияющих на гидrolитосферные процессы, включая интенсивность и продолжительность осадков, тип почвы, рельеф и антропогенное влияние.

Модели позволяют прогнозировать изменения в уровне грунтовых вод, речном стоке, скорости эрозии и других параметрах гидrolитосферных систем.

Результаты моделирования могут быть использованы для разработки эффективных стратегий управления водными ресурсами, предотвращения эрозии и снижения рисков, связанных с наводнениями и засухами.

В целом, математическое моделирование является необходимым инструментом для понимания и управления гидrolитосферными процессами. Дальнейшее развитие моделирования будет способствовать эффективному управлению водными ресурсами и защите окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малков А.В., Першин М.И., Помеляйко И.С. и др. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод. Системный анализ, диагностика, прогноз и управление. – М.: Наука, 2015. – 283 с.
2. Георгиева М.А. Системный анализ эрозионно–русловых процессов // Современная наука и инновации. – 2024. – № 4. – С. 32-40.
3. Ivan M. Pershin, Elena G. Papush, Tatyana V. Kukharova,* and Vladimir A. Utkin. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral WaterWells. Water 2023 (Switzerland), 15, 2289. – <https://doi.org/10.3390/w15122289>. – 14 с.
4. Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Синтез распределенных систем управления гидrolитосферными процессами месторождений минеральных вод // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8 (157). – С. 123-137.
5. Георгиева М.А. Разработка алгоритма управления эрозионными процессами в русловой подсистеме горных и предгорных ландшафтов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2022. – № 1-2. – С. 23-26.
6. Pershin I.M., Kukharova T.V., Tsapleva V.V. Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials // Journal of Physics: Conference Series. Открытый доступ. Т. 1728. Вып. 119. January 2021. Номер статьи 0120172020. Annual International Conference on Complex Equipment and Quality Control Laboratories, CEQCL 2020, 14 April 2020 - 17 April 2020. – ISSN 17426588. – DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012017.
7. Дровосекова Т.И., Жерносек И.А. Моделирование гидrolитосферных процессов региона кавказских минеральных вод // В мире научных открытий. – 2013. – №. 2. – С. 164-176.
8. Витиска Н.И., Георгиева М.А. Применение компьютерного моделирования в вопросах изучения эрозии почв и русел рек // Информационные технологии в экологии, образовании и бизнесе: Матер. конференции, Нальчик, 01 января – 31 2021 года. – Нальчик, 2021. – С. 192-197.
9. Хаширова Т.Ю., Ламердонов К.З., Токмакова Д.А. [и др.]. Информационные технологии в решении некоторых экологических проблем на горных и предгорных ландшафтах // Современные проблемы прикладной математики, информатики и механики: Сб. трудов Международной научной конференции, Нальчик, 10–14 июня 2019 года. Т. II. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2019. – С. 152-159.
10. Khashirova T.Y., Georgieva M.A., Eleev I.Z. [et al.]. Information Technologies in the Solution of Some Environmental Problems on Mountain and Foothill Landscapes // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies IT and QM and IS 2019, Sochi, 23–27 сентября 2019 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 507-510.
11. Хаширова Т.Ю., Гергов А.Р., Георгиева М.А., Акбашева Г.А. Использование современных компьютерных технологий в задачах расчета экологической стабильности горных и предгорных ландшафтов // Инновационные технологии в природообустройстве и водопользовании: Сб. научных статей. Вып. 7. – Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровых (ООО«Полиграфсервис и Т»), 2017. – С. 204-210.

12. Хаширова Т.Ю., Гергов А.Р., Георгиева М.А., Акбаева Г.А. Применение информационных технологий при оценке экологической стабильности горных и предгорных ландшафтов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 7. – С. 83-87.
13. Зербалиев А.М., Георгиева М.А. Анализ механизма оползневых и эрозийных процессов на склонах горных ландшафтов // Природообустройство и мелиорация водосборов горных и предгорных ландшафтов: Сб. научных статей. Вып. 6. – Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровых, 2016. – С. 91-97.
14. Георгиева М.А., Арванова М.М., Газаев А.Х. Анализ моделей оползневой опасности долин горных рек республики Кабардино-Балкария // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 5. – С. 125-129.
15. Першин И.М., Малков А.В., Першин М.И. Математические модели гидrolитосферных процессов // Недрапользование XXI век. – 2018. – № 3. – С. 56-65.
16. Першин И.М., Кузьмин Н.Н., Малков А.В. Формирование целевых функций в задачах управления гидrolитосферными процессами // 5-я Российская мультikonференция по проблемам управления: Матер. конференции "Информационные технологии в управлении" (ИТУ-2012), Санкт-Петербург, 09–11 октября 2012 года. – СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2012. – С. 622-632.
17. Быстров С.В., Григорьев В.В. Математическая модель гидrolитосферных процессов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 9. – С. 863-868.
18. Дровосекова Т.И. Разработка математических моделей и синтез системы управления гидrolитосферными процессами Пятигорского месторождения минеральных вод. – СПб.: Петерб. гос. электротехн. ун-т (ЛЭТИ), 2015.
19. Цаплева В.В. Системный анализ гидrolитосферных процессов региона г. Лермонтова: дис. – ЮФУ, 2012.
20. Дровосекова Т.И., Першин И.М. Особенности моделирования гидrolитосферных процессов региона Кавказских Минеральных Вод // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), 2016. – Т. 1. – С. 229-232.

REFERENCES

1. Malkov A.V., Pershin M.I., Pomelyayko I.S. *in dr.* Kislovodskoe mestorozhdenie uglekislykh mineral'nykh vod. Sistemyy analiz, diagnostika, prognoz i upravlenie [Kislovodsk deposit of carbonated mineral waters. Systems analysis, diagnostics, forecast and management]. Moscow: Nauka, 2015, 283 p.
2. Georgieva M.A. Sistemyy analiz erozionno–ruslovykh protsessov [Systems analysis of erosion-channel processes], *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern science and innovation], 2024, No. 4, pp. 32-40.
3. Ivan M. Pershin , Elena G. Papush, Tatyana V. Kukharova,* and Vladimir A. Utkin. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral WaterWells. *Water* 2023 (Switzerland), 15, 2289. Available at: <https://doi.org/10.3390/w15122289>, 14 p.
4. Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I. Sintez raspredelennykh sistem upravleniya gidrolitosfernymi protsessami mestorozhdeniy mineral'nykh vod // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki.* – 2014. – № 8 (157). – S. 123-137.
5. Georgieva M.A. Razrabotka algoritma upravleniya erozionnymi protsessami v ruslovy podsysteme gornykh i predgornykh landshaftov [Synthesis of distributed control systems for hydrolithospheric processes of mineral water deposits], *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1-2, pp. 23-26.
6. Pershin I.M., Kukharova T.V., Tsapleva V.V. Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials, *Journal of Physics: Conference Series.* Vol. 1728, Issue 119. January 2021. Article number 0120172020. Annual International Conference on Complex Equipment and Quality Control Laboratories, CEQCL 2020, 14 April 2020 - 17 April 2020. ISSN 17426588. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012017.
7. Drovosekova T.I., Zhernosek I.A. Modelirovanie gidrolitosfernykh protsessov regiona kavkazskikh mineral'nykh vod [Modeling of hydrolithospheric processes in the region of Caucasian mineral waters], *V mire nauchnykh otkrytiy* [In the world of scientific discoveries], 2013, No. 2, pp. 164-176.

8. Vitiska N.I., Georgieva M.A. Primenenie komp'yuternogo modelirovaniya v voprosakh izucheniya erozii pochv i rusel rek [Application of computer modeling in the study of soil and river bed erosion], *Informatsionnye tekhnologii v ekologii, obrazovanii i biznese: Mater. Konferentsii* [Information technologies in ecology, education and business: Proceedings of the conference], Nal'chik, 01 January – 31 2021. Nal'chik, 2021, pp. 192-197.
9. Khashirova T.Yu., Lamerdonov K.Z., Tokmakova D.A. [i dr.]. Informatsionnye tekhnologii v reshenii nekotorykh ekologicheskikh problem na gornyykh i predgornyykh landshaftakh [Information technologies in solving some environmental problems in mountain and foothill landscapes], *Sovremennye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki: Sb. trudov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Nal'chik, 10–14 iyunya 2019 goda* [Modern problems of applied mathematics, informatics and mechanics: Collection of works of the International scientific conference, Nalchik, June 10-14, 2019]. Vol. II. Nal'chik: Kabardino-Balkarskiy gosudarstvennyy universitet im. Kh.M. Berbekova, 2019, pp. 152-159.
10. Khashirova T.Y., Georgieva M.A., Eleev I.Z. [et al.]. Information Technologies in the Solution of Some Environmental Problems on Mountain and Foothill Landscapes, *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies IT and QM and IS 2019, Sochi, 23–27 September 2019*. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, pp. 507-510.
11. Khashirova T.Yu., Gergov A.R., Georgieva M.A., Akbasheva G.A. Ispol'zovanie sovremennykh komp'yuternykh tekhnologiy v zadachakh rascheta ekologicheskoy stabil'nosti gornyykh i predgornyykh landshaftov [Use of modern computer technologies in the problems of calculating the environmental stability of mountain and foothill landscapes], *Innovatsionnye tekhnologii v prirodoobustroytve i vodopol'zovanii: Sb. nauchnykh statey* [Innovative technologies in nature management and water use: Collection of scientific articles], Issue 7. Nal'chik: Izd-vo M. i V. Kotlyarovykh (OOO«Poligrafservis i T»), 2017, pp. 204-210.
12. Khashirova T.Yu., Gergov A.R., Georgieva M.A., Akbasheva G.A. Primenenie informatsionnykh tekhnologiy pri otsenke ekologicheskoy stabil'nosti gornyykh i predgornyykh landshaftov [Application of information technologies in assessing the environmental stability of mountain and foothill landscapes], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2017, No. 7, pp. 83-87.
13. Zerbaliyev A.M., Georgieva M.A. Analiz mekhanizma opolznevoy i erozionnogo protsessov na sklonakh gornyykh landshaftov [Analysis of the mechanism of the landslide and erosion processes on the slopes of mountain landscapes], *Prirodoobustroytvo i melioratsiya vodosborov gornyykh i pred-gornyykh landshaftov: Sb. nauchnykh statey* [Nature management and melioration of watersheds of mountain and foothill landscapes: Collection of scientific articles], Issue 6. Nal'chik: Izd-vo M. i V. Kotlyarovykh, 2016, pp. 91-97.
14. Georgieva M.A., Arvanova M.M., Gazaev A.Kh. Analiz modeley opolznevoy opasnosti dolin gornyykh rek respubliki Kabardino-Balkariya [Analysis of landslide hazard models of mountain river valleys in the Kabardino-Balkaria Republic], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science], 2016, No. 5, pp. 125-129.
15. Pershin I.M., Malkov A.V., Pershin M.I. Matematicheskie modeli gidrolitosfernykh protsessov [Mathematical models of hydrolithospheric processes], *Nedropol'zovanie XXI vek* [Subsoil use XXI century], 2018, No. 3, pp. 56-65.
16. Pershin I.M., Kuz'min N.N., Malkov A.V. Formirovanie tselevykh funktsiy v zadachakh upravleniya gidrolitosfernymi protsessami [Formation of target functions in problems of hydrolithospheric processes control], *5-ya Rossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: Mater. konferentsii "Informatsionnye tekhnologii v upravlenii" (ITU-2012), Sankt-Peterburg, 09–11 oktyabrya 2012 goda* [5th Russian multi-conference on management problems: Proceedings of the conference "Information technologies in management" (ITU-2012), St. Petersburg, October 9-11, 2012]. Saint Petersburg: TSNII "Elektropribor", 2012, pp. 622-632.
17. Bystrov S.V., Grigor'ev V.V. Matematicheskaya model' gidrolitosfernykh protsessov [Mathematical model of hydrolithospheric processes], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Bulletin of higher educational institutions. Instrument engineering], 2017, Vol. 60, No. 9, pp. 863-868.
18. Drovosekova T.I. Razrabotka matematicheskikh modeley i sintez sistema upravleniya gidrolitosfernymi protsessami Pyatigorskogo mestorozhdeniya mineral'nykh vod [Development of mathematical models and synthesis of a control system for hydrolithospheric processes of the Pyatigorsk mineral water deposit]. Saint Petersburg: Peterb. gos. elektrotekhn. un-t (LETI), 2015.

19. Tsapleva V.V. Sistemnyy analiz gidrolitosferykh protsessov regiona g. Lermontova: dis. [Systems analysis of hydrolithospheric processes in the region of the city of Lermontov: diss]. YuFU, 2012.
20. Drovosekova T.I., Pershin I.M. Osobennosti modelirovaniya gidrolitosferykh protsessov regiona Kavkazskikh Mineral'nykh Vod [Features of modeling hydrolithospheric processes in the region of the Caucasian Mineral Waters], Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam [International Conference on Soft Computing and Measurements]. Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy elektrotekhnicheskiy universitet LETI im. V.I. Ul'yanova (Lenina), 2016, Vol. 1, pp. 229-232.

Георгиева Марьяна Альбековна – Южный федеральный университет; e-mail: maryana.g@list.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79674177490; аспирант.

Першин Иван Митрофанович – e-mail: ivmp@yandex.ru; тел.: +79288251910; д.т.н.; профессор.

Georgieva Maryana Albekovna – Southern Federal University; e-mail: maryana.g@list.ru; Taganrog, Russia; phone: +79674177490; graduate student.

Pershin Ivan Mitrofanovich – e-mail: ivmp@yandex.ru; +79288251910; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.942+519.171

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-131-142

Е.Р. Зяблова

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ ПОДХОДОВ

Предложен подход к моделированию социальных взаимодействий в организационных системах, который состоит из несколько этапов: получение данных о пользователях системы, например при помощи парсинга сети; формирование ГН-модели системы на основе нечетких графов с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями; вычисление графовых характеристик с учетом определенного типа связи; использование значений графовых характеристик для анализа системы с учетом заложенной смысловой нагрузки. Обоснована целесообразность использования ГН-графа для исследования социальных отношений в организационных системах, так как он обладает рядом преимуществ. ГН-граф позволяет задать все необходимые разнотипные отношения и при этом уменьшить время анализа системы в 1,9 раз за счет использования множественных связей в виде вектора, позволяющих объединить несколько разнотипных связей. Модификация модели заключается в использовании разнотипных вершин. Тип вершин в графе определяется через вычисление их характеристик. В работе показан процесс формирования графовой модели подсистемы и вычисления ее характеристик. Показаны результаты вычисления степеней вершин, их центральности по степеням. Для вычисления метрических характеристик графовой модели использован модифицированный алгоритм поиска кратчайших путей в ГН-графе, разработанный ранее. Особенностью данного алгоритма является возможность использовать фильтры по типу вершин и связей. Получены численные показатели радиуса и диаметра графа, определены группы центральных и периферийных вершин, вычислены центральности вершин по близости с учетом выбранных типов связей для исследования разнотипных отношений в системе. Анализ подсистемы выполнен на примере решения двух практических задач. Среди пользователей сети выявлены группы сотрудников предприятия, определены их возможные статусы и коммуникативные активности. Под статусом пользователя понимается принадлежность к группам руководителей разного уровня, группе рядовых сотрудников предприятия. Предложено решение задачи выявления пользователей (групп пользователей), наиболее подходящих для распространения (или, наоборот, нераспространения) информации в сети.

ГН-граф; разнотипные вершины; множественные разнотипные связи; метрики графа; центральность вершины; организационная система, сеть.

E.R. Zyablova

MODELING OF SOCIAL INTERACTIONS BASED ON GRAPH APPROACHES

The article proposes an approach to modeling social interactions in organizational systems, which consists of several stages: obtaining data about system users, for example, using network parsing; forming a GH-model of the system based on fuzzy graphs with different types of vertices and multiple different types of edges; calculating graph characteristics taking into account a certain type of edges; using values of graph characteristics to analyze the system taking into account the inherent semantic load. The expediency of using the GH graph for the study of social relations in organizational systems is substantiated, since it has a number of advantages. The GH-graph allows you to set all the necessary multi-type relationships and at the same time reduce the time of system analysis by 1.9 times by using multiple edges in the form of a vector, allowing you to combine several different types of edges. Modification of the model consists in using different types of vertices. The type of vertices in the graph is determined by calculating their characteristics. The paper shows the process of forming a graph model of a subsystem and calculating its characteristics. The results of calculating the degrees of vertices and their centrality by degrees are shown. To calculate the metric characteristics of the graph model, a modified algorithm for finding shortest paths in the GH-graph was used, which was previously developed. A special feature of this algorithm is the ability to use filters based on the type of vertices and edges. Numerical indices of the radius and diameter of the graph are obtained, groups of central and peripheral vertices are determined, the centrality of vertices in proximity is calculated, taking into account the selected types of edges for the study of different types of relations in the system. The analysis of the subsystem is carried out using the example of solving two practical problems. Groups of employees of the enterprise were identified among the network users, their possible statuses and communicative activities were determined. The user status refers to belonging to groups of managers of different levels, a group of ordinary employees of the enterprise. A solution to the problem of identifying users (groups of users) most suitable for the dissemination (or, conversely, non-proliferation) of information on the network is proposed.

GH-graph; vertices of different types; multiple edges of different types; graph metrics; vertex centrality; organizational system; network.

Введение. Задача моделирования социальных взаимодействий остается актуальной на протяжении последних лет. Исследователям интересны процессы информационного обмена среди пользователей социальных, профессиональных сетей, внутри предприятий и организаций и др.

Задачи, которые решаются в рамках таких исследований, носят разносторонний характер, в том числе: моделирование конкурентных взаимодействий [1]; работа с экспертным сообществом для оценивания перспективы применения моделей в реальных социальных процессах [2]; прогнозирование социально-экономических процессов [3]; социализация роботов; формирование рекомендаций в решении кадровых вопросов сотрудников предприятий; формирование карьерных траекторий выпускников ВУЗов [4] и др.

Для решения задач, направленных на исследование социальных взаимодействий, используют различные методы и модели. Широко известны мультиагентные подходы, изложенные в работах классиков (В.И. Городецкого, Д.А. Поспелова, П.О. Скобелева, В.Б. Тарасова, М. Вудриджа (M. Wooldridge), Н. Дженнингса (N. Jennings), К. Хьюитта (C. Hewitt), Й. Шоэма (Y. Shoham) и др.), акторные подходы в соответствии с акторно-сетевой теорией (Б. Латур (B. Latour), М. Каллон (M. Callon), Дж. Ло (John Law), А. Мол (A. Mol)), когнитивное моделирование, в том числе использование нечетких когнитивных моделей [5–8], моделирование на основе графовых подходов и др.

В рамках данного исследования сделан акцент на использование возможностей математического аппарата теории графов. Очевидно, что для моделирования социальных взаимодействий недостаточно классических графовых моделей, возникает необходимость в применении моделей на основе графов, допускающие разнотипные связи [9, 10]. Для представления социальных отношений в организационных системах в работе [11]

предложено использование *GH*-моделей¹, в том числе нечетких графов с множественными и разнотипными связями, позволяющих задать все необходимые отношения и при этом уменьшить время анализа системы [13].

Формальное описание *GH*-графа. В работе [14] предложена модифицированная нечеткая графовая модель с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями (*GH*-граф). «Формально такой граф

$$G = (Gv, Ge) \quad (1)$$

задан нечеткими конечными множествами вершин $Gv = \{gv_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ (gv – *graph vertex*) и связей $Ge = \{ge_l \mid l = 1, 2, \dots, m\}$ (ge – *graph edge*).

Вершины в таком графе могут быть разнотипными, тогда множество вершин графа содержит подмножества вершин по типу: $Gv = \{Gv(tpv_p)\}$. Связи в графе, заданном в соответствии с (1), могут быть:

- ◆ неориентированными ($gv_i - gv_j$) и ориентированными ($gv_i \rightarrow gv_j$);
- ◆ однотипными ($gv_i - gv_j, gv_i \rightarrow gv_j$);
- ◆ разнотипными ($gv_i - tp - gv_j, gv_i - tp \rightarrow gv_j$, где tp – *type*);
- ◆ множественными связями в виде вектора ($gv_i - \bar{v} - gv_j, gv_i - \bar{v} \rightarrow gv_j$). Здесь связь в виде вектора позволяет объединить t разнотипных связей и представляется в виде

$$\bar{v} = \langle v_1, v_2, \dots, v_t \rangle,$$

где t – размерность вектора или кратность связи v .

Таким образом, множество связей графа содержит подмножества однотипных связей $Ge(o)$, разнотипных связей $Ge(tp_k)$ и связей в виде вектора $Ge(v_e)$: $Ge = \{Ge(o), Ge(tp_k), Ge(v_e)\}$ [14].

Вершинам и связям графа, заданных нечеткими множествами, соответствуют весовые коэффициенты $\eta_i \in [0,1]$ и $\mu_l \in [0,1]$. Степени принадлежности нечетким множествам могут назначаться экспертами или вычисляться при помощи фаззификации [15].

Проведенные ранее результаты экспериментальных исследований на модифицированных графовых моделях размером 50 – 150 вершин показали уменьшение времени анализа данных в системах с разнотипными потоками не менее, чем в 1,9 раз за счет использования множественных связей в виде вектора по сравнению с графами, допускающими только однотипные и разнотипные связи [14]. Это подтверждает обоснованность применение *GH*-графов для моделирования сложных систем.

Для моделирования социальных взаимодействий, в том числе для решения ряда практических задач, направленных на исследование организационных систем предлагается подход, основанный на выполнении следующих этапов:

1) получение обезличенных данных о пользователях (их статус, возможные отношения, некоторые персональные данные, например возраст, профессия, пол и т.д.) одним из возможных способов:

- ◆ при помощи парсинга сети (социальной, профессиональной или др.). Здесь можно использовать различные парсеры (существующие или разработанные под конкретные задачи), например парсер описанный в работе [16];
- ◆ использовать уже имеющиеся датасеты;

2) представление полученных данных в виде *GH*-графа, формирование графовой модели с учетом соответствия вершин графа объектам системы, связей в графе – отношениям между объектами системы. К атрибутам вершины можно отнести ее вес, тип, а к атрибутам связи – направленность, тип и вес. Подробно возможные атрибуты объектов системы и элементов *GH*-графа описаны в работе [17];

¹ Термин «*GH*-модель» предложен в работе [12] и представляет собой объединение графовых и гиперграфовых моделей. Поскольку граф является частным случаем гиперграфа, то в рамках данного исследования к нечетким графам с множественными и разнотипными связями будем применять термин «*GH*-граф».

- 3) организация вычисления характеристик на графовой модели;
- 4) использование (интерпретация) вычисленных значений характеристик для анализа организационной системы с учетом заложенной смысловой нагрузки в модель.

Следующий шаг является необязательным. Получение рекомендаций по решению практической задачи возможно с использованием методов машинного обучения, например, графовых нейронных сетей (ГНС), см. работу [14]. В рамках данного исследования этот шаг не рассматривается.

Поясним предложенный подход на примере.

Предположим, что при помощи парсинга сети получены следующие сведения о системе. Объектами организационной системы являются субъекты (пользователи сети Π_k). Пользователи общаются между собой при помощи различных средств коммуникации, например, почтовый сервис, корпоративная платформа, закрытый канал связи. Кроме того, известно, что между некоторыми пользователями отмечены отношения «влиять».

Необходимо решить ряд задач:

- 1) выявить группу пользователей в рамках одного предприятия, определить их возможный статус (руководители различного уровня, рядовые сотрудники предприятия, не сотрудники и т.д.) и их характеристики (степень коммуникабельности и др.);

- 2) выявить группу пользователей, наиболее подходящих для распространения (или, наоборот, нераспространения) информации в сети.

На основе полученных данных о системе приступим к формированию графовой модели.

Формирование графовой модели на основе ГН-графа. Полученная в результате парсинга сети графовая модель G оказалась достаточно большой (около 10000 вершин). В результате применения алгоритма разделения [18] получен подграф G_1 , который соответствует подсистеме (рис. 1).

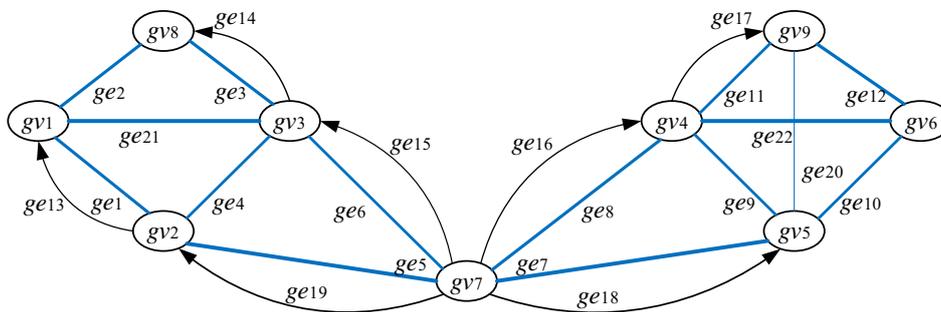


Рис. 1. Модель организационной подсистемы в виде подграфа G_1

Объекты системы (пользователи $\Pi_1 - \Pi_9$) представлены в подграфе вершинами $gv_1 - gv_9$. Статус пользователей не определен средствами парсинга, поэтому не определены атрибуты вершин (тип, вес) подграфа G_1 .

Существующие отношения между пользователями: «влиять», «общаться» по различным каналам связи (почтовый сервис, корпоративная платформа, закрытый канал связи) представлены в подграфе связями. Например, отношение «влиять» может соответствовать ориентированной связи типа tp_1 , отношения «общаться» по различным каналам связи (почтовый сервис, корпоративная платформа, закрытый канал связи) – разнотипные отношения, которые могут соответствовать разнотипным неориентированным связям. Однако, ГН-граф позволяет объединить некоторые связи в множественную связь в виде вектора, что целесообразно выполнить в данном случае, так как в текущий момент времени пользователи используют только один канал связи из трех возможных. Тогда множество связей подграфа G_1 будет представлено в виде $Ge = \{Ge(tp_1), Ge(v_{1.1}, v_{1.2}, v_{1.3})\}$.

В табл. 1 отражены возможные отношения между пользователями и их соответствия связям подграфа.

Вербальное описание показателей зависит от численных значений весов вершин и связей подграфа η_i и μ_i , например, если $\mu_i = 0$, то показатель отсутствует, $\mu_i = [0,01; 0,39]$ соответствует слабому показателю, $\mu_i = [0,40; 0,69]$ – умеренному показателю, $\mu_i = [0,70; 1,00]$ – сильному показателю.

На следующем этапе следует выполнить анализ подсистемы путем применения средств вычисления характеристик на полученной модели.

Таблица 1

Соответствие отношений в подсистеме связям подграфа G_1

Виды связей	Типы связей	Связи подграфа, ge_i	Веса связей подграфа, μ_i	Отношения между элементами подсистемы
$gv_i - tp \rightarrow gv_j$	tp_1	ge_{13}	0,5	«влиять»
		ge_{14}	0,5	
		ge_{15}	0,7	
		ge_{16}	0,8	
		ge_{17}	0,6	
		ge_{18}	0,9	
		ge_{19}	0,5	
$gv_i - \bar{v} - gv_j$	$\bar{v}_1 = \langle v_{1.1}, v_{1.2}, v_{1.3} \rangle$	ge_1	0,3; 0,7; 0	«общаться»: $v_{1.1}$ – почтовый сервис; $v_{1.2}$ – корпоративная платформа; $v_{1.3}$ – закрытый канал связи.
		ge_2	0,4; 0,6; 0	
		ge_3	0,5; 0,5; 0	
		ge_4	0,3; 0,7; 0	
		ge_5	0,2; 0,5; 0,3	
		ge_6	0,4; 0,3; 0,3	
		ge_7	0,4; 0,4; 0,2	
		ge_8	0,4; 0,3; 0,3	
		ge_9	0,2; 0,7; 0,1	
		ge_{10}	1,0; 0; 0	
		ge_{11}	0,2; 0,7; 0,1	
		ge_{12}	1,0; 0; 0	
		ge_{20}	0,4; 0,5; 0,1	
		ge_{21}	0,3; 0,7; 0	
		ge_{22}	1,0; 0; 0	

Анализ организационной подсистемы путем вычисления характеристик подграфа G_1 . Графовые характеристики, используемые для анализа социальных отношений в организационных системах, и их возможные интерпретации рассмотрены в ряде работ [19–21 и др.]. В рамках нашего исследования для анализа подсистемы будем использовать следующие характеристики подграфа G_1 , которые можно объединить в группы.

Группа 1. Метрики, зависящие от инцидентных связей:

- ◆ локальная степень вершины $s(gv_i)$;
- ◆ полустепени исхода и захода вершин, соответственно $s^-(gv_i)$ и $s^+(gv_i)$;
- ◆ центральность вершины по степени $Cs(gv_i)$;
- ◆ центральности вершины по полустепени исхода и захода, соответственно $Cs^-(gv_i)$ и $Cs^+(gv_i)$;

Группа 2. Метрики, зависящие от расстояния:

- ◆ радиус графа $r(G_1)$;
- ◆ диаметр $d(G_1)$;
- ◆ группы центральных и периферийных вершин ($O(G_1)$ и $P(G_1)$);
- ◆ центральность вершины по близости $Cc(gv_i)$.

Перечисленные выше характеристики довольно известны для широкого круга исследователей, поэтому подробно рассмотрим только характеристики центральности и их возможные интерпретации.

Центральность вершины по степени $Cs^\circ(gv_i)$ определяется по формуле:

$$Cs^\circ(gv_i) = \frac{s(gv_i)}{(n-1)},$$

где $s(gv_i)$ – локальная степень i -ой вершины графа.

Центральность вершины по степени может быть интерпретирована как показатель активности пользователя в сети. В случае направленности сети используются входящая $Cs^+(gv_i)$ и исходящая $Cs^-(gv_i)$ центральности по степени. Чем выше значение входящей центральности по степени $Cs^+(gv_i)$, тем выше уровень востребованности пользователя, что говорит о том, что за действиями такого субъекта будет следить много людей. Высокая исходящая центральность по степени $Cs^-(gv_i)$ указывает на то, что пользователь является «властным». Такой тип субъекта сможет быстро распространить информацию в сети.

Центральность вершины по близости $Cc(gv_i)$ вычисляется как показано ниже:

$$Cc(gv_i) = \frac{(n-1)}{\sum_1^{(n-1)} d(gv_i, gv_j)},$$

где $\sum_1^{(n-1)} d(gv_i, gv_j)$ – сумма минимальных расстояний между вершиной gv_i и остальными вершинами. При вычислении показателя центральности вершины по близости учитываются не только множество инцидентных ей связей, но и связи, инцидентные ее соседям. В связи с этим пользователь, соответствующей вершине с высоким показателем центральности по близости, имеет доступ к большому количеству других пользователей благодаря связям, в которые он включен.

Вычисление характеристик обеих групп для графов с однотипными связями не составляет труда, для чего используются стандартные средства (формулы) классической теории графов. Нестандартным является процесс организации вычислений на графах с множественными и разнотипными связями, так как в вычислении могут участвовать связи разного типа, тогда затруднительна интерпретация полученных числовых значений характеристик для анализа системы.

Для решения этой проблемы предлагается простой механизм фильтрации вершин и связей, например, если в подграфе G_1 оставить только связи типа tp_1 , соответствующие отношению «влиять». Тогда будет получен подграф $G_{1,1}$, как показано на рис. 2.

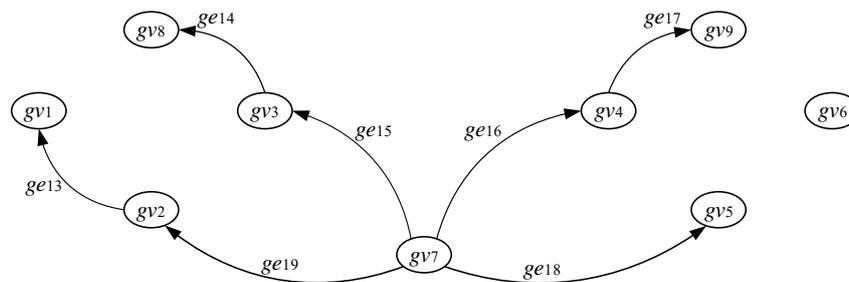


Рис. 2. Пример подграфа $G_{1,1}$

Определение метрик первой группы.

Связи типа tp_1 в подграфе $G_{1,1}$ позволяют исследовать отношение «влиять» в подсистеме. В табл. 2 приведены значения центральностей и полустепеней вершин с учетом таких связей.

Для того, чтобы определить пользователя Π_i , оказывающего наибольшее влияние на других пользователей, необходимо найти вершину с максимальным значением $Cs^-(gv_i)$ и минимальным значением $Cs^+(gv_i)$. Этому условию удовлетворяет вершина gv_7 , для которой получены следующие значения $Cs^-(gv_7) = 0,5$ и $Cs^+(gv_7) = 0$, $s^-(gv_7) = 4$ и $s^+(gv_7) = 0$.

Таблица 2

Численные значения характеристик вершин подграфа $G_{1.1}$

Характеристики вершин	Вершины подграфа $G_{1.1}$								
	gv_1	gv_2	gv_3	gv_4	gv_5	gv_6	gv_7	gv_8	gv_9
$s^-(gv_i)$	0	1	1	1	0	0	4	0	0
$s^+(gv_i)$	1	1	1	1	1	0	0	1	1
$Cs^-(gv_i)$	0	0,125	0,125	0,125	0	0	0,5	0	0
$Cs^+(gv_i)$	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0	0	0,125	0,125

Следовательно, пользователь Π_7 , соответствующий вершине gv_7 в подграфе $G_{1.1}$, возглавит список влиятельных пользователей, так как он оказывает влияние на четырех других пользователей, а сам не подвержен влиянию со стороны.

Полученные значения $Cs^-(gv_i) = Cs^+(gv_i) = 0,125$ и $s^-(gv_i) = s^+(gv_i) = 1$ для вершин gv_2, gv_3, gv_4 с учетом интерпретации связей позволяют сделать следующий вывод: группа пользователей $\Pi_2 - \Pi_4$ подвержены умеренному влиянию и сами оказывают умеренное влияние на других пользователей системы.

Аналогично, остальные пользователи ($\Pi_1, \Pi_5, \Pi_8, \Pi_9$) подвержены умеренному влиянию и сами не оказывают какого-то ощутимого влияния на других пользователей системы, так как для вершин gv_1, gv_5, gv_8, gv_9 получены значения $s^-(gv_i) = 0, s^+(gv_i) = 1$. При этом значения $s^-(gv_6) = s^+(gv_6) = 0$ для вершины gv_6 демонстрируют, что соответствующий пользователь Π_6 не подвержен влиянию и не оказывает влияние сам.

Тогда список пользователей, оказывающих наибольшее влияние на других субъектов сети, будет составлен в порядке убывания $\Pi_{вл} = \langle \Pi_7, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_1, \Pi_5, \Pi_8, \Pi_9 \rangle$.

Далее, если в исходном подграфе G_1 оставить только множественные связи в виде вектора $\bar{v}_1 = (v_{1.1}, v_{1.2}, v_{1.3})$, то будет получен подграф $G_{1.2}$ (рис. 3).

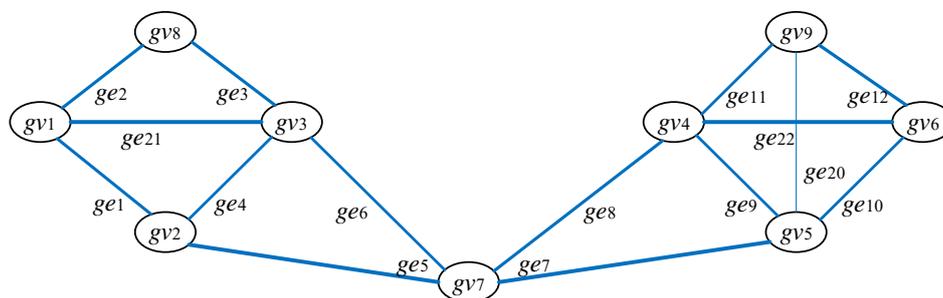


Рис. 3. Пример подграфа $G_{1.2}$

Множественные связи в виде вектора $\bar{v}_1 = (v_{1.1}, v_{1.2}, v_{1.3})$ соответствуют отношению «общаться» через почтовый сервис ($v_{1.1}$), корпоративную платформу ($v_{1.2}$) и закрытый канал связи ($v_{1.3}$). Следовательно, для анализа информационных потоков пользователей целесообразно в подграфе $G_{1.2}$ оставлять поочередно связи $\bar{v}_1 = (v_{1.1})$, $\bar{v}_1 = (v_{1.2})$ и $\bar{v}_1 = (v_{1.3})$.

Аналогичные подходы описаны в работе [22], где предложен модифицированный алгоритм поиска кратчайших путей в GH -графе для моделирования взаимодействия объектов сложных технических систем. Этот алгоритм показал хорошие результаты и вместе с тем позволяет обрабатывать граф, заданный исходным множеством связей, либо выбранным подмножеством связей. Все вместе это позволяет использовать разработанный автором алгоритм и для моделирования социальных взаимодействий в организационных системах.

Вычисленные значения центральных и степеней вершин подграфа $G_{1.2}$ представлены в табл.3.

Таблица 3

Численные значения характеристик вершин подграфа $G_{1,2}$

Характеристики вершин с учетом связей в виде вектора \underline{v}_1		Вершины подграфа $G_{1,2}$								
		gv_1	gv_2	gv_3	gv_4	gv_5	gv_6	gv_7	gv_8	gv_9
$v_{1,1}$	$s(gv_i)$	3	3	4	4	4	3	4	2	3
	$Cs(gv_i)$	0,37	0,37	0,5	0,5	0,5	0,37	0,5	0,25	0,37
$v_{1,2}$	$s(gv_i)$	3	3	4	4	4	0	4	2	3
	$Cs(gv_i)$	0,37	0,37	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,25	0,37
$v_{1,3}$	$s(gv_i)$	0	3	4	4	4	0	4	0	3
	$Cs(gv_i)$	0	0,37	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0	0,37

Здесь можно видеть следующее, если учтены множественные связи в виде вектора $\underline{v}_1 = (v_{1,3})$, то для ряда вершин (gv_1, gv_6, gv_8) значения локальных степеней вершин соответствуют «0». Это связано с тем, что веса связей $ge_1 - ge_4, ge_{10}, ge_{12}, ge_{21}, ge_{22}$ по вектору $v_{1,3}$ принимают нулевые значения (см. табл. 1), следовательно для ряда пользователей Π_1, Π_6, Π_8 отсутствует отношение «общаться» через закрытый канал связи.

Аналогично, с учетом множественных связей в виде вектора $\underline{v}_1 = (v_{1,2})$ численное значение локальной степени вершины $s(gv_6) = 0$, так как для пользователя Π_6 отсутствует отношение «общаться» через корпоративную платформу (в табл. 1 видно, что веса связей $ge_{10}, ge_{12}, ge_{22}$ по вектору $v_{1,2}$ принимают нулевые значения).

Проанализировав табл. 3 можно выделить группу вершин $\{gv_3, gv_4, gv_5, gv_7\}$ с высокими показателями $s(gv_i)$ и $Cs(gv_i)$ для всех трех связей в виде вектора \underline{v}_1 , что свидетельствует об активности пользователей $\Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_7$ в распространении информации по различным каналам (высокой степени коммуникабельности).

Таким образом, список наиболее активных пользователей, участвующих в распространении информации по всем трем каналам, можно представить в порядке убывания $\Pi_a = \langle \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_7, \Pi_2, \Pi_9 \rangle$.

Если рассматривать пользователей подсистемы как потенциальных сотрудников конкретного предприятия для решения задачи 1, то пользователь Π_7 скорее всего руководитель 1-го уровня, так как он возглавляет списки пользователей по влиятельности и активности в передаче информации. При этом пользователь Π_6 скорее всего не является сотрудником предприятия, так как отличные от нуля значения $s(gv_6)$ и $Cs(gv_6)$ имеются только для связи в виде вектора $\underline{v}_1 = (v_{1,1})$, соответствующей отношению «общаться» через почту.

Продолжая анализировать списки $\Pi_{вл}$ и Π_a , можно распределить пользователей по группам с определенным статусом, как показано в табл. 4.

Таблица 4

Соответствие объектов подсистемы вершинам подграфа G_1

Назначение объектов системы	Статус объекта	Вершины графа	Типы вершин графа, tpv_i	Весы вершин графа, η_i
пользователь Π_7	руководитель 1-го уровня	gv_7	tpv_1	1,0
пользователи $\Pi_2 - \Pi_4$	руководители 2-го уровня	$gv_2 - gv_5$	tpv_2	по 0,7
пользователи $\Pi_1, \Pi_5, \Pi_8, \Pi_9$	сотрудники	gv_1, gv_8, gv_9	tpv_3	0,5
пользователь Π_6	не сотрудник	gv_6	tpv_4	0,2

Объекты системы (пользователи $\Pi_1 - \Pi_9$) в зависимости от статуса представлены в графе разнотипными вершинами. В табл. 4 пользователи сети распределены по группам: руководители 1-го и 2-го уровней и рядовые сотрудники предприятия, а также пользователь Π_6 , не являющийся сотрудником). Тип вершины соответствует группе пользователей по статусу, а вес вершины – степени значимости пользователя. Таким образом решена задача 1 и определены атрибуты вершин подграфа G_1 для дальнейшего исследования.

Определение метрик второй группы. Для вычисления метрик, зависящих от расстояний, использован модифицированный алгоритм поиска кратчайших путей в *GH*-графе [22]. Вычисления проведены для подграфа $G_{1,2}$ отдельно по связям в виде вектора $\bar{v}_1 = (v_{1,1})$, $\bar{v}_1 = (v_{1,2})$ и $\bar{v}_1 = (v_{1,3})$. Полученные численные значения метрических характеристик представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Метрические характеристики подграфа $G_{1,2}$

вектор \bar{v}_1	Метрики подграфа с учетом связей в виде вектора \bar{v}_1			
	радиус, $r(G_{1,2})$	диаметр, $d(G_{1,2})$	группа центральных вершин, $O(G_{1,2})$	группа периферийных вершин, $P(G_{1,2})$
$v_{1,1}$	1,0	2,3	$\{gv_4\}$	$\{gv_6, gv_8\}$
$v_{1,2}$	1,0	2,0	$\{gv_7\}$	$\{gv_1, gv_9\}$
$v_{1,3}$	0,3	0,7	$\{gv_7\}$	$\{gv_2, gv_3, gv_9\}$

Таблица 6

Метрические характеристики вершин подграфа $G_{1,2}$

вектор \bar{v}_1	Центральность вершины по близости, $Cc(gv_i)$								
	gv_1	gv_2	gv_3	gv_4	gv_5	gv_6	gv_7	gv_8	gv_9
$v_{1,1}$	1,26	1,56	1,35	1,6	1,42	0,6	1,6	0,84	1,21
$v_{1,2}$	1,03	1,26	1,66	1,45	1,37	0	1,9	1,12	0,93
$v_{1,3}$	0	3,8	3,8	4,7	5,7	0	5,7	0	4,2

Если исследуются информационные потоки в системе, то группа центральных и периферийных вершин в графе соответствует объектам системы, через которые проходит соответственно, максимальное и минимальное количество информационных потоков. При этом показатель центральности вершины по близости $Cc(gv_i)$ характеризует степень посредничества объекта при передаче информации, т.е. учитывает его связи.

Тогда полученные значения $O(G_{1,2}) = \{gv_4\}$ по $v_{1,1}$, $O(G_{1,2}) = \{gv_7\}$ по $v_{1,2}$ и $v_{1,3}$ (см. табл. 5) можно интерпретировать так – пользователи Π_4 и Π_7 обладают лучшими коммуникативными свойствами по выбранным каналам связи. А полученные значения радиуса $r(G_{1,2})$ и диаметра $d(G_{1,2})$ соответствуют времени доступа к пользователям в абсолютных величинах. Например, значение $r(G_{1,2}) = 1,0$ можно интерпретировать как минимальное время распространения информации в системе (если информацию распространять через корпоративную платформу, начиная с пользователя Π_7), а значение $d(G_{1,2}) = 2,0$ – как максимальное время распространения информации в системе.

Пользователи, соответствующие вершинам из подмножеств $P(G_{1,2})$ по связям $v_{1,1}$, $v_{1,2}$ и $v_{1,3}$, наоборот обладают наихудшими коммуникативными свойствами для передачи информации по выбранным каналам связи.

Анализ показателей центральности вершины по близости $Cc(gv_i)$ в табл. 6 позволяет распределить пользователей в группы по степени посредничества в коммуникации по трем каналам передачи данных в порядке убывания:

- ◆ через почтовый сервис $\Pi_{k1} = \langle \Pi_4, \Pi_7, \Pi_2, \Pi_5, \Pi_3, \Pi_1, \Pi_9, \Pi_8, \Pi_6 \rangle$;
- ◆ через корпоративную платформу $\Pi_{k2} = \langle \Pi_7, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_2, \Pi_8, \Pi_1, \Pi_9 \rangle$;
- ◆ через закрытый канал связи $\Pi_{k3} = \langle \Pi_5, \Pi_7, \Pi_4, \Pi_9, \Pi_2, \Pi_3 \rangle$.

Тогда, можно сделать следующий вывод. Для вброса информации в сеть целесообразно использовать группу пользователей $\{\Pi_4, \Pi_5, \Pi_7\}$. Таким образом решена задача 2.

Заключение. Предложенный в работе подход к моделированию социальных взаимодействий в организационных системах показал свою эффективность для решения ряда практических задач. Подход включает в себя несколько этапов, в том числе получение данных о пользователях системы; формирование *GH*-модели системы на основе нечетких графов с множественными и разнотипными связями; вычисление графовых характеристик для анализа системы с учетом заложенной смысловой нагрузки.

ГН-граф обладает рядом преимуществ, а именно позволяет задать все необходимые отношения и при этом уменьшить время анализа системы в 1,9 раз за счет использования множественных связей в виде вектора, позволяющих объединить несколько разнотипных связей. Новизна модели заключается в использовании разнотипных вершин. Тип вершин в графе определяется через вычисление их характеристик.

В работе выполнен анализ подсистемы на примере решения двух практических задач. Сформирована графовая модель подсистемы. Выявлены группы сотрудников предприятия, определены их возможные статусы и коммуникативные активности. Предложено решение задачи выявления пользователей (групп пользователей), наиболее подходящих для распространения (или, наоборот, нераспространения) информации в сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малков С.Ю., Шпырко О.А. Особенности социальных взаимодействий: базовая модель // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. – Т. 15, № 6. – С. 1673-1693. – DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-6-1673-1693.
2. Андриянова Т.В. Экспертное сообщество в моделировании социального взаимодействия: возможности и барьеры // Сб. научных трудов: Экспертные институты в XXI веке: принципы, технологии, культура. – Иркутск. Изд-во: Иркутский государственный университет, 2022. – С. 30-33.
3. Коровин Д.И. О развитии экспертного метода анализа моделей прогнозирования социально-экономических процессов // Современная математика и концепции инновационного математического образования. – 2022. – С. 138-146.
4. Кокодей Т.А., Горбачёва А.В., Посная Е.А. Формирование индивидуальной карьерной траектории выпускника ВУЗа // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2023. – № 2 (95). – С. 233-239.
5. Поздеева Е.Г. Мультиагентный подход и его преимущества в исследовании социальных процессов // Системный анализ в проектировании и управлении. – 2020. – С. 229-235. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-127.
6. Борисов В.В. Нечёткие когнитивные модели как основа для исследования сложных систем и процессов // Речевые технологии. – 2020. – № 1-2. – С. 48-62.
7. Kolodenkova A.E. and Muntyan E.R. Researches of interaction of actors with use fuzzy hypergraph and cognitive modeling // Papers in English 14th International scientific-technical conference on actual problems of electronics instrument engineering: IEEE, 2018. – Vol. 8. – P. 127-131. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545550.
8. Gorelova G.V. Cognitive modeling of complex systems: state and prospects // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 442 LNNS. – P. 212-224.
9. Boccaletta S., Bianconi G., Criado R., del Genio C.I., Gómez-Gardeñes J., Romaned M., Sendiña-Nadal J., Wangk Z., Zanin M. The structure and dynamics of multilayer networks. Preprint submitted to Physics Reports. – 2014. – 157 p.
10. Contractor N.S., Monge P.R., Leonardi P.M. Multidimensional networks and the dynamics of sociomateriality: bringing technology inside the network // International Journal of Communication. – 2011. – No. 5. – P. 682-720.
11. Мунтян Е.Р. Аспекты использования нечетких ГН-моделей для представления социальных отношений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2020. – № 3 (7). – С. 113-121. – DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-113-121.
12. Сергеев Н.Е., Целых Ю.А. ГН-модели социальных сетей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 90-95.
13. Еремеев А.П., Мунтян Е.Р. Разработка онтологии на основе графов с множественными и разнотипными связями // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2021. – №3. – С. 3-18. – DOI: 10.14357/20718594210301.
14. Зяблова Е.Р. Использование графовых подходов для решения задачи прогнозирования в области формирования карьерных траекторий. //Тр. XII Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». В 2-х т. Т. 1. – Смоленск: Универсум, 2024. – С. 150-158.
15. Ярушклина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
16. Мунтян Е.Р., Колоденкова А.Е. Использование парсера социальных сетей для моделирования организационных систем // Информатизация и связь. – 2022. – № 2. – С. 30-34. – DOI: 10.34219/2078-8320-2022-13-2-30-34.
17. Мунтян Е.Р. Формирование цифрового портрета субъекта на основе парсинга сети для построения карьерной траектории // Информатизация и связь. – 2023. – № 2. – С. 36-41. – DOI: 10.34219/2078-8320-2023-14-2-36-41.

18. Мунтян Е.Р. Разработка алгоритма пропорционального разделения GH-графа для формирования зон влияния объектов в сложных технических системах // Программные продукты и системы. – 2023. – Т. 36, № 3. – С. 378-387. – DOI: 10.15827/0236-235X.143.378-387.
19. Ипатов Ю.А., Калагин И.В. Анализ динамических характеристик целевых групп социальных сетей // Кибернетика и программирование. – 2019. – № 1. – С. 37-50. – DOI: 10.25136/2644-5522.2019.1.18417.
20. Мунтян Е.Р. Подходы к догенерации графа репрезентативной выборки для моделирования взаимодействия социальных групп // Информатизация и связь. 2018. – № 4. – С. 18-24.
21. Зяблова Е.Р., Волощук В.И. Организация поиска сообществ в социальных сетях с использованием GH-графов // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Сб. статей по материалам научной VII Всероссийской Поспеловской конференции. Калининград, Санкт-Петербург, 2024. – С. 294-302.
22. Зяблова Е.Р. Модификация алгоритма поиска кратчайших путей GH-графа для анализа сложных технических систем // Программные продукты и системы. – 2024. – Т. 37 № 3. – С. 354-363. – DOI: 10.15827/0236-235X.147.354-363.

REFERENCES

1. Malkov S.Yu., Shpyrko O.A. Osobennosti social'nykh vzaimodeystviy: bazovaya model' [Features of social interactions: a basic model], *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and modeling], 2023, Vol. 15, No 6, pp. 1673-1693.
2. Andrianova T.V. Ekspertnoe soobshchestvo v modelirovanii social'nogo vzaimodeystviya: vozmozhnosti i bar'ery [Expert community in modeling social interaction: opportunities and barriers], *Sb. nauchnykh trudov: Ekspertnye instituty v XXI veke: printsipy, tekhnologii, kul'tura* [Collection of scientific papers: Expert institutions in the XXI century: principles, technologies, culture], Irkutsk. Publishing house: Irkutsk State University, 2022, pp. 30-33.
3. Korovin D.I. O razvitii ekspertnogo metoda analiza modeley prognozirovaniya social'no-ekonomicheskikh processov [On the development of an expert method for analyzing models of forecasting socio-economic processes], *Sovremennaya matematika i kontsepcii innovatsionnogo matematicheskogo obrazovaniya* [Modern mathematics and concepts of innovative mathematical education], 2022, pp. 138-146.
4. Kokodey T.A., Gorbacheva A.V., Postnaya E.A. Formirovanie individual'noy kar'ernoy traektorii vypusknika VUZa [Formation of an individual career trajectory of a university graduate], *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the North Caucasus Federal University], 2023, No 2 (95), pp. 233-239.
5. Pozdeeva E.G. Mul'tiagentnyy podkhod i ego preimushchestva v issledovanii sotsial'nykh protsessov [Multi-agent approach and its advantages in the study of social processes], *Sistemnyy analiz v proektirovanii i upravlenii* [System analysis in design and management], 2020, pp. 229-235.
6. Borisov V.V. Nechetkie kognitivnye modeli kak osnova dlya issledovaniya slozhnykh sistem i protsessov [Fuzzy cognitive models as a basis for the study of complex systems and processes], *Rechevye tekhnologii* [Speech technologies], 2020, No. 1-2, pp. 48-62.
7. Kolodenkova A.E. and Muntyan E.R. Researches of interaction of actors with use fuzzy hypergraph and cognitive modeling, *Papers in English 14th International scientific-technical conference on actual problems of electronics instrument engineering: IEEE, 2018*, vol. 8, pp. 127-131.
8. Gorelova G.V. Cognitive modeling of complex systems: state and prospects, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, Vol. 442 LNNS, pp. 212-224.
9. Boccaletti S., Bianconi G., Criado R., del Genio C.I., Gómez-Gardeñes J., Romaned M., Sendiña-Nadal J., Wang Z., Zanin M. The structure and dynamics of multilayer networks. Preprint submitted to *Physics Reports*, 2014, 157 p.
10. Contractor N.S., Monge P.R., Leonardi P.M. Multidimensional networks and the dynamics of sociomateriality: bringing technology inside the network, *International Journal of Communication*, 2011, No 5, pp. 682-720.
11. Muntyan E.R. Aspekty ispol'zovaniya nechetkikh GH-modeley dlya predstavleniya sotsial'nykh otnosheniy [Aspects of using fuzzy GH-models for representing social relations], *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Tver State Technical University. Series «Technical Science»], 2020, No 3 (7), pp. 113-121.
12. Sergeev N.E., Tselykh Yu.A. GH-modeli sotsial'nykh setey [GH-models of social networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Southern Federal University. Technical sciences], 2009, No 1 (90), pp. 90-95.

13. Eremeev A.P., Muntyan E.R. Razrabotka ontologii na osnove grafov s mnozhestvennymi i raznotipnymi svyaziyami [Development of an ontology based on graphs with multiple and different types of edges], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making], 2021, No 3, pp. 3-18.
14. Zyablova E.R. Ispol'zovanie grafovyykh podkhodov dlya resheniya zadachi prognozirovaniya v oblasti formirovaniya kar'ernykh traektoriy [The use of graph approaches to solve the problem of forecasting in the field of career trajectories formation], *Tr. XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte»* [Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference "Integrated models and soft computing in artificial intelligence"], in 2 vol. Vol. 1. Smolensk: Univerzum, 2024, pp. 150-158.
15. Yarushkina N.G. Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh sistem [Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems], Moskva: Finansy i statistika, 2004, 320 p.
16. Muntyan E.R., Kolodenkova A.E. Ispol'zovanie parsera social'nykh setey dlya modelirovaniya organizatsionnykh sistem [Using a social network parser for modeling of organizing systems], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2022, No 2, pp. 30-34.
17. Muntyan E.R. Formirovanie tsifrovogo portreta sub'ekta na osnove parsinga seti dlya postroeniya kar'ernoy traektorii [Formation of a digital portrait of the subject based on network parsing to build a career trajectory], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2023, No 3, pp. 36-41.
18. Muntyan E.R. Razrabotka algoritma proporsional'nogo razdeleniya GH-grafa dlya formirovaniya zon vliyaniya ob'ektov v slozhnykh tekhnicheskikh sistemakh [Developing a GH-graph proportional separation algorithm to form of object influence zones in complex technical systems], *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems], 2023, vol. 36(3), pp. 378-387.
19. Ipatov Yu.A., Kalyagin I.V. Analiz dinamicheskikh kharakteristik tselevykh grupp sotsial'nykh setey [Analysis of dynamic characteristics of target groups of social networks], *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2019, No. 1, pp. 37-50.
20. Muntyan E.R. Podkhody k dogeneratsii grafa reprezentativnoy vyborke dlya modelirovaniya vzaimodeystviya sotsial'nykh grupp [Approaches to the graph increasing of representative sample for modeling the interaction of social groups], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2018, No 4, pp. 18-24.
21. Zyablova E.R., Voloshchuk V.I. Organizatsiya poiska soobshchestv v sotsial'nykh setyakh s ispol'zovaniem GH-grafov [Organization of community search in social networks using GH graphs], *Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy: Sb. statej po materialam nauchnoy VII Vserossiyskoy Pospelovskoy konferentsii* [Hybrid and synergetic intelligent systems. collection of articles based on the materials of the scientific VII All-Russian Pospelov conference], Kaliningrad, St. Petersburg, 2024, pp. 294-302.
22. Zyablova E.R. Modifikatsiya algoritma poiska krachayshikh putey GH-grafa dlya analiza slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Modification of the algorithm for finding shortest paths for the formation of influence zones of objects in complex technical systems on GH-graphs], *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems], 2024, vol. 37, No 3, pp. 354-363.

Зяблова Евгения Ростиславна – Южный федеральный университет; e-mail: zero32f@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Zyablova Evgenia Rostislavna – Southern Federal University; e-mail: zero32f@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371608; the Department of Computer Science; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 517.977.1

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-142-155

Ю.А. Кораблёв

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СХОДСТВА ОСТАВШЕГОСЯ ПОЛЕЗНОГО СРОКА СЛУЖБЫ

В этой статье показано, как построить полный рабочий процесс оценки оставшегося полезного срока службы (Retaining Useful Life - RUL), включая этапы предварительной обработки, выбора трендовых функций, построения индикатора работоспособности путем объединения датчиков, обучения оценщиков сходства RUL и проверки эффективности прогнозирования. Тестирование метода проводилось в демонстрационной программе MATLAB, реализующей данный

метод прогнозирования возникновения неисправностей в технических системах (<https://www.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>) на основе данных из "PHM08 Challenge Data Set", NASA Ames Prognostics Data Repository (<http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository>), NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA. Метод ориентирован на использование обоснованных технических характеристик оцениваемого оборудования, достаточно полно освещенных в справочной литературе. Поэтому хорошие результаты метод дает при оценке оборудования, условия эксплуатации которого, близки к среднестатистическим. В статье используется Predictive Maintenance Toolbox™ системы MATLAB, который включает в себя несколько специализированных моделей, разработанных для вычисления RUL из различных типов измеренных системных данных. Эти модели полезны, когда у вас есть исторические данные и информация, такие как: – истории работы до отказа машин, похожих на ту, которую необходимо диагностировать. Исторические данные для каждого члена ансамбля данных подгоняются под модель идентичной структуры; – известное пороговое значение некоторого индикатора состояния, указывающего на отказ; – данные о том, сколько времени или сколько использования потребовалось для выхода из строя похожих машин (срок службы). Модели оценки RUL предоставляют методы для обучения модели с использованием исторических данных и их использования для выполнения прогнозирования оставшегося срока службы. Термин срок службы здесь относится к сроку службы машины, определяемому с точки зрения любой величины, используемой для измерения срока службы системы. Аналогично, эволюция времени может означать эволюцию значения с использованием, пройденным расстоянием, количеством циклов или другой величиной, которая описывает срок службы. Общай рабочий процесс для использования моделей оценки RUL: – создать и настроить соответствующий объект модели; – обучите модель оценки с использованием имеющихся исторических данных; – используя тестовые данные того же типа, что и имеющиеся исторические данные, оцените RUL тестового компонента. Также можно использовать тестовые данные рекурсивно для обновления модели по мере поступления новых данных, т.е. отслеживать эволюцию прогноза RUL по мере поступления новых данных.

Неисправности; диагностика состояния технической системы; прогнозирование возникновения неисправностей; оставшийся полезный срок службы; индикатор работоспособности; оценщик сходства RUL.

J.A. Korabiev

PREDICTION OF FAULTS IN TECHNICAL SYSTEMS BASED ON THE SIMILARITY MODEL OF THE REMAINING USEFUL LIFE

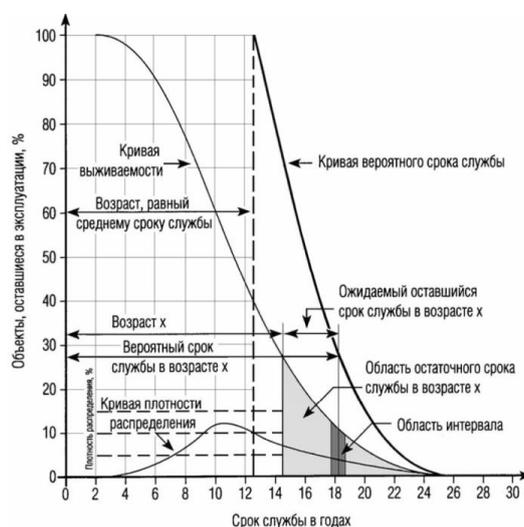
This paper demonstrates how to construct a complete Remaining Useful Life (RUL) estimation workflow, including the steps of preprocessing, selecting trend features, constructing a health indicator by fusing sensors, training RUL similarity estimators, and verifying the prediction performance. The method was tested in a MATLAB demo program implementing this method for predicting the occurrence of faults in technical systems (<https://www.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>) based on data from the "PHM08 Challenge Data Set", NASA Ames Prognostics Data Repository (<http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository>), NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA. The method is focused on the use of reasonable technical characteristics of the equipment being estimated, which are sufficiently covered in the reference literature. Therefore, the method gives good results when assessing equipment whose operating conditions are close to the statistical average. This paper uses the Predictive Maintenance Toolbox™ in MATLAB, which includes several specialized models developed for calculating RUL from various types of measured system data. These models are useful when you have historical data and information, such as: – failure histories of machines similar to the one to be diagnosed. The historical data for each member of the data ensemble is fitted to a model of identical structure; – a known threshold value of some condition indicator indicating failure; – data on how much time or how much use it took for similar machines to fail (service life). RUL estimation models provide methods for training a model using historical data and using it to make a remaining service life prediction. The term service life here refers to the useful life of a machine defined in terms of any quantity used to measure the service life of a system. Similarly, time evolution can mean the evolution of a value with usage, distance traveled, number of cycles, or another quantity that describes the service life. A general workflow for using RUL estimation models is: – create and configure the corresponding model object; – train the estimation model using the available historical data; – using test data of the same type as the available historical data, estimate the RUL of the test component. It is also possible to use the test data recursively to update the model as new data becomes available, i.e. track the evolution of the RUL prediction as new data becomes available.

Faults; diagnostics of the state of the technical system; prediction of faults; remaining useful life (RUL); health indicator; RUL similarity evaluator.

Введение. Актуальным и эффективным на сегодня подходом к техническому обслуживанию и ремонтам (ТОиР) являются методы прогнозного и проактивного обслуживания, основанные на прогнозе технического состояния [1] и оценке рисков [2]. Это связано с повышением текущего уровня техники и стремительного развития информационных технологий.

При использовании технологий раннего диагностирования и прогнозирования технического состояния оборудования конечной целью предприятий является техническое обслуживание в тот момент, когда это наиболее рентабельно. Благодаря этому решается задача по снижению вероятности внепланового простоя, вызванного не выявленным своевременно дефектом или износом, а также сокращение затрат на проведение ТОиР, что в свою очередь повышает безотказность и рентабельность производства, экономит время и деньги на плановые ремонты. Дополнительными преимуществами является: увеличение срока службы оборудования, повышение безопасности производства, уменьшение количества аварий и оптимизация комплектов запасных частей и принадлежностей (ЗИП) и материалов.

Технически эту задачу можно сформулировать как определение оставшегося срока службы, для чего существуют разные инструменты, например, кривая Айова (Survivor Iowa) [3].



В данной статье рассматривается применение для решения данной задачи основе модели сходства оставшегося полезного срока службы.

Модели оценки RUL. Модели RUL полезны, когда имеются исторические данные и информация, такие как:

- ◆ Истории выполнения к отказу машин
- ◆ Известное пороговое значение некоторого индикатора состояния, который указывает на отказ
- ◆ Данные о том, сколько времени или сколько использования потребовалось для подобных машин, чтобы достигнуть отказа (время жизни)

Модели оценки RUL предоставляют методы для обучения модели с помощью исторических данных и с помощью него для выполнения прогноза остающегося срока полезного использования. Термин lifetime здесь относится к жизни машины, заданной с точки зрения любого количества, которое используется, чтобы измерить системную жизнь.

Общий рабочий процесс для использования моделей оценки RUL включает следующие шаги:

- ◆ Выберите лучший тип модели оценки RUL для данных и системного знания. Создайте и сконфигурируйте соответствующий объект модели.
- ◆ Обучите модель оценки использование исторических данных.

- ◆ Используя тестовые данные того же типа как исторические данные, оцените RUL тестового компонента

Данные RUL. Мониторинг состояния сложного объекта или процесса необходим для раннего выявления опасных ситуаций или их устранения с незначительными потерями. Исходной информацией для мониторинга служат данные, снимаемые с датчиков, которые характеризуют изменения параметров отслеживаемого объекта. На основе этой информации возможно прогнозирование отдельных параметров объекта. В этом случае, при условии реализации этого процесса в реальном времени возможна оценка состояния объекта на последующие временные промежутки, следующие за текущим. Таким образом, вопросы прогнозирования параметров являются актуальными для обеспечения безопасности функционирования сложных объектов и процессов.

Применение метода на основе модели сходства для прогнозирования неисправностей будет показано на демонстрационном примере MATLAB (<https://www.mathworks.com/help/predmaint/ug/similarity-based-remaining-useful-life-estimation.html>), описывающем, как построить полный рабочий процесс оценки оставшегося полезного срока службы (RUL), включая этапы предварительной обработки, выбора трендовых функций, построения индикатора работоспособности путем объединения датчиков, обучения оценщиков сходства RUL и проверки эффективности прогнозирования. В примере используются данные обучения из набора данных "PHM08 Challenge Data Set", NASA Ames Prognostics Data Repository (<http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository>), NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA. [4].

Данные о деградации технического устройства содержат 260 выборок данных, описывающих работу до отказа. Эту группу измерений называют «ансамблем». Каждый участник ансамбля представляет собой таблицу с 26 столбцами. Столбцы содержат данные об идентификаторе машины, отметке времени, 3 рабочих условиях и 21 измерении датчика. Для целей исследования необходимо разделить данные о деградации на набор обучающих данных и набор проверочных данных для последующей оценки производительности. Для этого необходимо все доступные данные разбить на три временных отрезка: где отрезки 1 и 2 должны содержать данные только при нормальной работе оборудования. Отрезок 1 должен содержать данные для обучения модели. Отрезок 2 – данные для тестовой выборки (оценка модели и определения средней абсолютной ошибки прогнозирования значения параметра). Отрезок 3 – обязательно требуется наличие зафиксированных неисправностей.

Визуализируем часть данных (рис. 1):

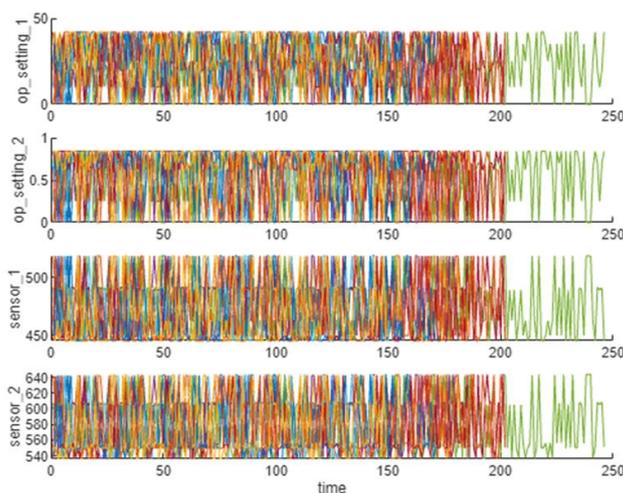


Рис. 1. Визуализация данных ансамбля

Как видно по визуализации, нет четкой тенденции, показывающей процесс деградации в каждом измерении от запуска до отказа. Для извлечения более четких тенденций деградации из сигналов датчиков будут использоваться рабочие условия, каждый член ансамбля содержит 3 рабочих условия: «op_setting_1», «op_setting_2» и «op_setting_3».

Предварительная обработка данных. Первой задачей будет кластеризация данных, цель которой определение основных рабочих режимов. Для этого применяется алгоритм К-средних. Основная идея алгоритма k-средних заключается в том, что данные произвольно разбиваются на кластеры, после чего итеративно перевычисляется центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы разбиваются на кластеры вновь в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Цель алгоритма заключается в разделении n наблюдений на k кластеров таким образом, чтобы каждое наблюдение принадлежало ровно одному кластеру, расположенному на наименьшем расстоянии от наблюдения.

Визуализируем результаты кластеризации и выявленные центроиды кластеров.

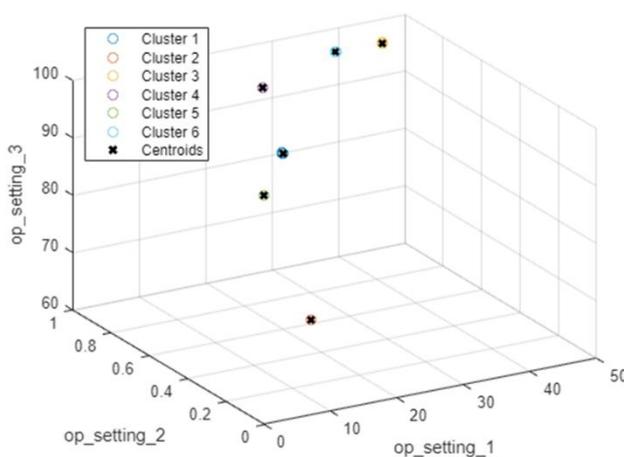


Рис. 2. Результаты кластеризации

Как видно из графика, алгоритм кластеризации нашел 6 рабочих режимов.

Далее проводим первичную обработку данных, прежде всего нормализацию измерений, сгруппированных по различным рабочим режимам. Для этого используются методы статистической обработки данных [5]. Вычисляем среднее значение и стандартное отклонение каждого измерения датчика, сгруппированного по рабочим режимам.

Статистику в каждом режиме используем для нормализации данных обучения. Для каждого члена ансамбля извлекаются рабочие точки каждой строки, вычисляется его расстояние до каждого центра кластера и находится ближайший центр кластера. Затем для каждого измерения датчика вычитается среднее значение и делится на стандартное отклонение этого кластера. Если стандартное отклонение близко к 0, устанавливается нормализованное измерение датчика на 0, поскольку почти постоянное измерение датчика бесполезно для оценки оставшегося срока службы.

Визуализируем данные, нормализованные по рабочему режиму (рис. 3). Как видно, после нормализации удастся выделить некоторые тенденции деградации для некоторых измерений датчика.

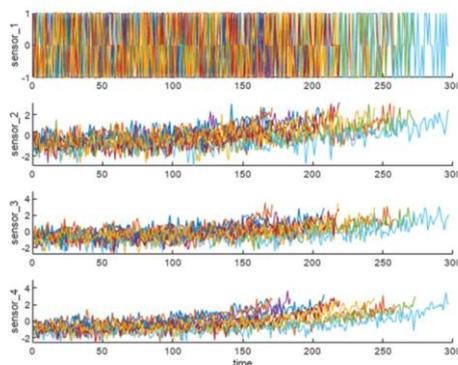


Рис. 3. Данные после нормализации

Выбор трендовых функций. Теперь необходимо выбрать наиболее трендовые измерения датчика, чтобы построить индикатор работоспособности для прогнозирования. Идея использования этого инструмента состоит в том, что для описания степени износа оборудования используется некоторая функция, которая и получила название «индикатор здоровья» (Health Indicator, HI) или индикатор работоспособности. Аргументом этой функции является некоторый набор объективных параметров оборудования, а ее значение косвенно характеризует степень износа оборудования или узла при данном значении аргумента. Показатель HI предназначен для интегральной характеристики степени износа оборудования или его отдельных узлов. В настоящее время общепринятого подхода к конструированию HI не сформировано, ввиду объективно существующего различия как в принципах функционирования оборудования различных типов, так и в методах получения объективной информации относительно его текущего статуса. В зависимости от используемой модели представления HI, разработано и опробовано значительное число подходов оценивания его статуса [6]. В том числе регрессионные и авторегрессионные модели, различные варианты кластерного анализа, модели на основе нейронных сетей, скрытые марковские модели и ансамбли классификаторов [7–9]. Таким образом, индикатор работоспособности является основным инструментом прогнозирования, анализа надежности технической системы [10]. Трендовый подход в прогнозировании предполагает экстраполяцию выровненных значений динамического временного ряда прогнозируемого показателя. Прогноз-тренд – это прогноз, основанный на использовании линейной экстраполяции, сложившихся в прошлом тенденций. Таким образом, для выделения трендов используется линейная модель деградации и производится ранжирование наклонов сигналов.

Отсортируем наклоны сигнала и выберем 8 датчиков с наибольшими наклонами. Визуализируем выбранные трендовые измерения датчика (рис. 4).

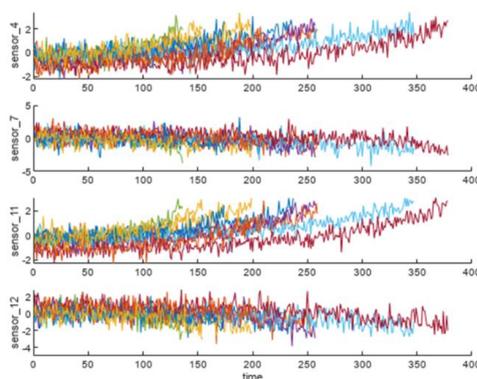


Рис. 4. Трендовые измерения датчика

Следует обратить внимание, что некоторые из наиболее трендовых сигналов демонстрируют положительные тенденции, а другие – отрицательные.

Построение индикатора работоспособности. Для построения индикатора работоспособности для модели сходства используется следующий подход. Необходимо объединить измерения датчиков в один индикатор работоспособности, с помощью которого обучается модель на основе сходства.

Предполагается, что все данные о запуске до отказа начинаются с работоспособного состояния. Работоспособности в начале присваивается значение 1, а работоспособности при отказе присваивается значение 0. Предполагается, что работоспособность линейно ухудшается от 1 до 0 с течением времени. Эта линейная деградация используется для объединения значений датчиков.

Визуализируем состояние здоровья (рис. 5).

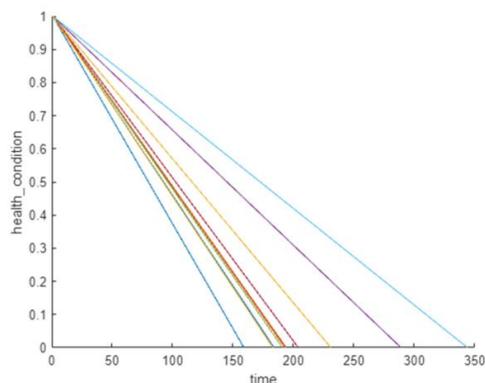


Рис. 5. Состояние здоровья

Состояние здоровья всех членов ансамбля меняется от 1 до 0 с различной скоростью ухудшения. Теперь подгоним линейную регрессионную модель состояния здоровья с наиболее трендовыми измерениями датчиков в качестве регрессоров и создадим единый индикатор работоспособности, умножив показания датчиков на соответствующие им веса. Визуализируем объединенный индикатор здоровья для обучающих данных (рис. 6).

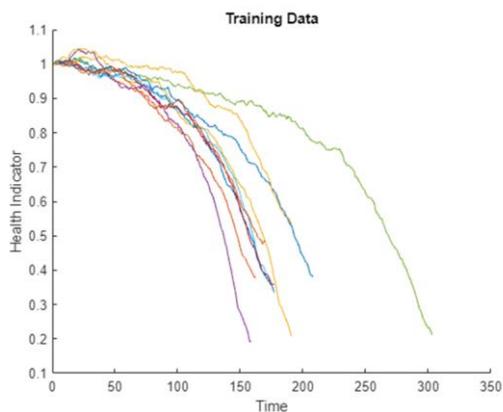


Рис. 6. Объединенный индикатор здоровья

Данные с нескольких датчиков объединяются в один индикатор здоровья. Индикатор здоровья сглаживается фильтром скользящего среднего. Ту же операцию применяют к данным проверки и повторяют процесс нормализации режима и объединения датчиков с набором данных проверки. Визуализируем индикатор работоспособности для проверки данных (рис. 7).

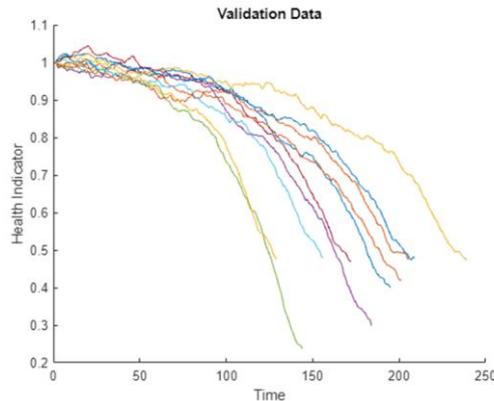


Рис. 7. Индикатор работоспособности для проверки данных

Построение модели сходства RUL. Модели сходства или модели подобия основывают прогноз RUL тестовой машины на известном поведении подобных машин от исторической базы данных. Такие модели сравнивают тренд в тестовых данных или значениях индикатора состояния к той же информации, извлеченной от другой, аналогичной системы.

Модели подобия полезны когда:

- ◆ У вас есть данные выполнения к отказу из аналогичных систем, записи временных рядов [11]. Данные выполнения к отказу являются данными, которые запускаются во время здоровой операции и заканчиваются, когда машина находится в состоянии близко к отказу или обслуживанию.
- ◆ Данные выполнения к отказу показывают подобные поведения ухудшения. Таким образом, изменения данных некоторым характеристическим способом показывают, как система ухудшается.

Таким образом можно использовать модели подобия, когда можно получить так называемый профиль ухудшения из ансамбля данных. Профили ухудшения представляют эволюцию одного или нескольких индикаторов состояния для каждой машины в ансамбле как переходы машины от здорового состояния до дефектного состояния. Анализ таких моделей часто встречается при описании методов машинного обучения [12–13].

Теперь построим модель сходства RUL для данной задачи на основе остатков, используя данные обучения. В этой настройке модель пытается подогнать каждый объединенный набор данных к полиному 2-го порядка.

Расстояние между данными i и данными j вычисляется по 1-норме остатка

$$d(i,j) = \|y_j - \hat{y}_{j,i}\|_1,$$

где y_j – индикатор работоспособности машины j , $\hat{y}_{j,i}$ – оценочный индикатор работоспособности машины j с использованием полиномиальной модели 2-го порядка, идентифицированной в машине i .

Оценка сходства вычисляется по следующей формуле

$$score(i,j) = \exp(-d(i,j)^2).$$

При наличии одного члена ансамбля в наборе проверочных данных модель найдет ближайшие 50 членов ансамбля в наборе обучающих данных, подберет распределение вероятностей на основе 50 членов ансамбля и будет использовать медиану распределения в качестве оценки RUL.

Оценка производительности. Одной из важнейших характеристик любого разработанного алгоритма является его производительность [14, 15]. Чтобы оценить производительность в модели RUL сходства, используем 50%, 70% и 90% выборочных данных проверки, чтобы спрогнозировать ее RUL.

Визуализируем проверочные данные, усеченные на 50%, и их ближайших соседей (рис. 8), и и распределение вероятностей расчетного RUL (рис. 9).

Существует относительно большая ошибка между оценочным RUL и истинным RUL, когда машина находится на промежуточной стадии работоспособности. В этом примере наиболее похожие 10 кривых близки в начале, но раздваиваются, когда приближаются к состоянию отказа, что приводит к примерно двум режимам в распределении RUL.

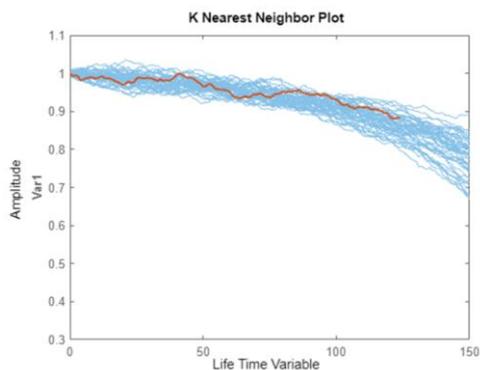


Рис. 8. Визуализация проверочных данных, усеченных на 50%

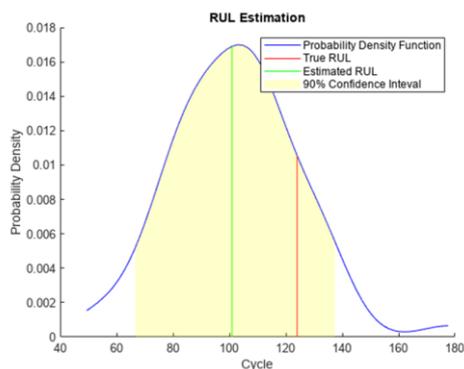


Рис. 9. Распределение вероятностей расчетного RUL (50%)

Используем данные проверки до второй точки останова, которая составляет 70% срока службы (рис. 10 и 11).

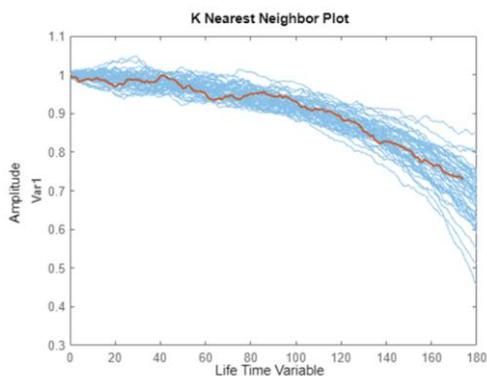


Рис. 10. Визуализация проверочных данных, усеченных на 70%

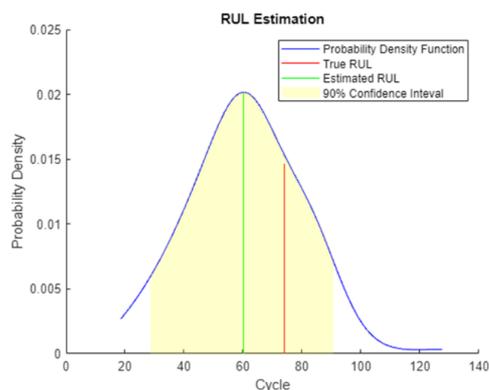


Рис. 11. Распределение вероятностей расчетного RUL (70%)

При наличии большего количества данных оценка RUL улучшается. Теперь используем данные проверки до третьей точки останова, которая составляет 90% от срока службы (рис. 12 и 13).

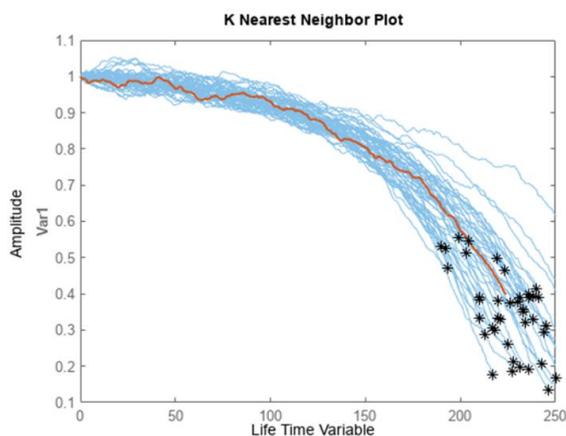


Рис. 12. Визуализация проверочных данных, усеченных на 90%

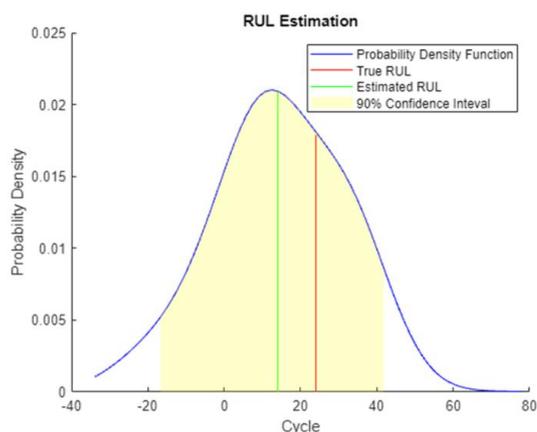


Рис. 13. Распределение вероятностей расчетного RUL (90%)

Когда машина близка к отказу, оценка RUL в этом примере еще больше улучшается.

Теперь повторим ту же процедуру оценки для всего набора данных проверки и вычислим ошибку между оценочным RUL и истинным RUL для каждой точки останова. Визуализируем гистограмму ошибки для каждой точки останова вместе с ее распределением вероятностей [16] (рис. 14).

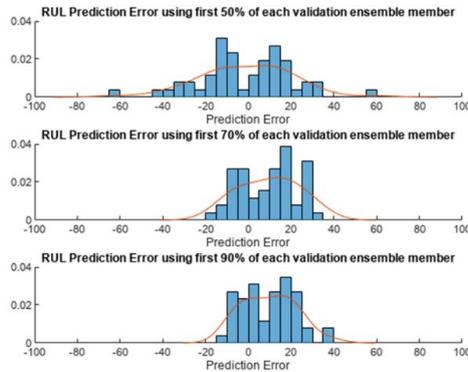


Рис. 14. Гистограмма ошибки и ее распределение вероятностей

Построим диаграмму ошибок прогнозирования, чтобы визуализировать медиану, 25-75 квантиль и выбросы (рис. 15).

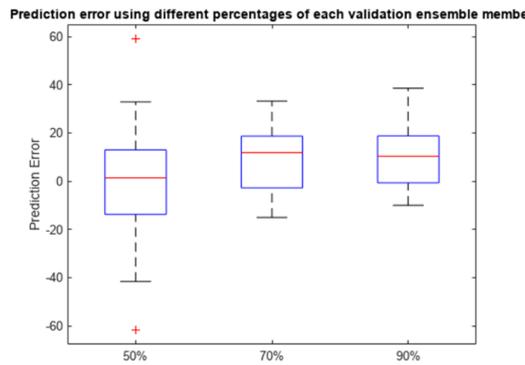


Рис. 15. Диаграмма ошибок прогнозирования

И, наконец, вычислим и визуализируем среднее значение и стандартное отклонение ошибки прогноза (рис. 16).

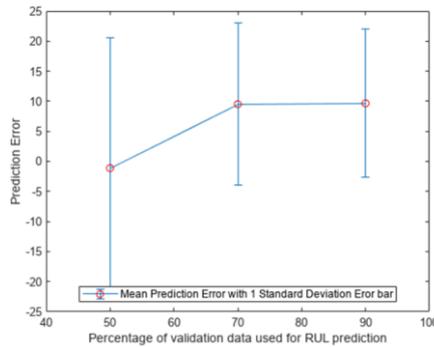


Рис. 16. Среднее значение и стандартное отклонение ошибки прогноза

Тем самым показано, что ошибка становится более сконцентрированной около 0 (меньше выбросов) по мере увеличения количества наблюдаемых данных.

Заключение. В России предиктивная аналитика надежности в настоящее время находится на стартовых позициях, однако интерес к применению современных методов прогнозирования в промышленности растет [17, 18]. Как показывает практика, в результате внедрения решений прогнозной аналитики предприятиям разных отраслей удается уменьшить количество поломок оборудования в среднем на 30–35%, сократить расходы на его обслуживание на 10–20%, и на 10–15% увеличить объем производства [19]. Рассмотренный в данной статье метод предиктивной аналитики по прогнозированию неисправностей в технических системах на основе модели сходства оставшегося полезного срока службы позволяет производить оценку оставшегося полезного срока службы с достаточно высокой степенью точности (в статье показано, что ошибка становится более сконцентрированной около 0 по мере увеличения количества наблюдаемых данных, рисунок 16 дает возможность количественной оценки) и может успешно применяться для решения данного класса задач. Новизна предлагаемого подхода к прогнозированию возникновения неисправностей заключается в том, что модели сходства основываются на прогноз RUL тестовой машины на известном поведении подобных машин из исторической базы данных. Такие данные легко доступны практически в любой технической системе. Такие модели сравнивают тенденцию в тестовых данных или значениях индикаторов состояния с той же информацией, извлеченной из других подобных систем. Применение этой модели особенно полезно, когда: – имеются в наличии данные о работе до отказа от подобных систем. Данные о работе до отказа – это данные, которые начинаются во время исправной работы и заканчиваются, когда машина находится в состоянии, близком к отказу или обслуживанию; – данные о работе до отказа показывают схожее поведение деградации. То есть данные изменяются некоторым характерным образом по мере того, как система деградирует. Таким образом особенно привлекательным является использование модели сходства, когда можно получить профили деградации из своего ансамбля данных. Профили деградации представляют собой эволюцию одного или нескольких индикаторов состояния для каждой машины в ансамбле по мере того, как машина переходит из исправного состояния в неисправное [20]. Особенность этой модели в том, что она работает с остатками. Оценка на основе остатков подгоняет предыдущие данные под модель, например, модель ARMA или модель, которая является линейной или экспоненциальной по времени использования. Затем она вычисляет остатки между данными, предсказанными из ансамблевых моделей, и данными из тестового компонента. Подход на основе остаточного сходства очень полезен, когда знания о системе включают форму для модели деградации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Как сократить расходы на обслуживание оборудования на 40 %. Блог Кирилла Костанецкого. – URL: <https://nv.ua/techno/technoblogs/chto-takoe-prediktivnoe-obslyuzhivanie-2476568.html>.
2. Proactive Asset Management with IIoT and Analytics, ARC Advisory Group, January 15, 2015, By Ralph Rio.
3. Рейли Р., Швайс Р. Оценка нематериальных активов: пер. с англ. – М.: ИД «КВИНТО-КОНСАЛТИНГ», 2005. – 792 с.
4. Saxena A. and Goebel K. "PHM08 Challenge Data Set", NASA Ames Prognostics Data Repository. – <http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository>. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA. – 2008.
5. Любимов И.В., Мешков С.А. Статистические методы контроля качества и надежности: учеб. пособие. Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2010. – 96 с. – ISBN 978-5-85546-522-8.
6. Гаврилюк Е.А., Манцеров С.А., Панов А.Ю. Прогнозирование отказов систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами на основе индекса технического состояния и степени риска // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 7-2. – С. 309-313.
7. Любимов И.В., Мешков С.А., Ушаков, А.П., Чалый Р.А. Методы и средства диагностирования технических систем: учеб. пособие. Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2011. – 120 с. – ISBN 978-5-85546-863-8.

8. *Кашицкий Ю.С., Игнатов Д.И.* Ансамблевый метод машинного обучения, основанный на рекомендации классификаторов // *Machine Learning in Python, Journal of Machine Learning Research*. – 2011. – 12. – С. 2825-2830.
9. *Попова Т.П.* Ансамбли моделей как современный инструмент анализа данных / ответст. за выпуск: д. эконом. наук, ректор Уральского государственного экономического университета. – 2017. – 256 с.
10. *Шимарев В.Ю.* Надежность технических систем: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.
11. *Дюк В.А., Фолмин В.В.* Прогнозирование временных рядов на основе методов DataMining // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. – 2012. – № 13. – С. 108-111.
12. *Шаханов Н.И., Осолков В.М., Варфоломеев И.А., Юдина О.В.* Прогнозирование отказов оборудования на основе алгоритмов машинного обучения // *Вопросы образования и науки. По материалам международной научно-практической конференции*, 31 мая 2016. – С. 315-317.
13. *Флах П.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 402 с.
14. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.* Алгоритмы: построение и анализ. – 2-е изд., пер. с англ. – М., 2005. – 1296 с.
15. *Макконнелл Дж.* Основы современных алгоритмов. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
16. *Вадзинский Р.Н.* Справочник по вероятностным распределениям. – СПб., 2001.
17. *Чугреев В.Л., Баданин Д.А.* Использование прогнозной аналитики в информационно-аналитических системах поддержки принятия решений // *Молодой ученый*. – 2016. – № 6. – С. 49-52.
18. *Линатов М.* Первый в России комплекс предиктивной аналитики для энергетического и промышленного оборудования // *Экспозиция Нефть Газ*. – 2016. – № 3 (49). – С. 82-83.
19. Прогнозная аналитика – способ адаптации в новых экономических реалиях. – URL: <http://www.iksmedia.ru/articles/5292204-Prognoznaya-analitika-sposob-adapta.html>.
20. *Кобл Джейми Баалис.* Объединение источников данных для предсказания оставшегося срока полезного использования – автоматизированный метод для идентификации прогностических параметров. – 2010.

REFERENCES

1. *Kak sokratit' raskhody na obsluzhivanie oborudovaniya na 40 %.* Blog Kirilla Kostanetskogo [How to reduce equipment maintenance costs by 40%. Blog by Kirill Kostanetsky]. Available at: <https://nv.ua/techno/techblogs/chto-takoe-prediktivnoe-obsluzhivanie-2476568.html>.
2. *Proactive Asset Management with IIoT and Analytics*, ARC Advisory Group, January 15, 2015, By Ralph Rio.
3. *Reyli R., Shvays R.* Otsenka nematerial'nykh aktivov [Evaluation of intangible assets]: transl. from english. Moscow: ID «KVINTO-KONSALTING», 2005, 792 p.
4. *Saxena A. and Goebel K.* "PHM08 Challenge Data Set", NASA Ames Prognostics Data Repository. Available at: <http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository>. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, 2008.
5. *Lyubimov I.V., Meshkov S.A.* Statisticheskie metody kontrolya kachestva i nadezhnosti: ucheb. posobie [Statistical methods of quality and reliability control: a tutorial]. Baltic State Technological University. St. Petersburg., 2010, 96 p. ISBN 978-5-85546-522-8.
6. *E.A., Mantserov S.A., Panov A.Yu.* Prognozirovaniye otkazov sistem avtomaticheskogo upravleniya gazoperekachivayushchimi agregatami na osnove indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya i stepeni riska [Forecasting failures of automatic control systems of gas pumping units based on the technical condition index and risk degree], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, No. 7-2, pp. 309-313.
7. *Lyubimov I.V., Meshkov S.A., Ushakov, A.P., Chalyy R.A.* Metody i sredstva diagnostirovaniya tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie [Methods and tools for diagnosing technical systems: a tutorial]. Baltic State Technological University. St. Petersburg., 2011, 120 p. ISBN 978-5-85546-863-8.
8. *Kashnitskiy Yu.S., Ignatov D.I.* Ansamblevyuy metod mashinnogo obucheniya, osnovannyy na rekomendatsii klassifikatorov [Ensemble method of machine learning based on classifier recommendations], *Machine Learning in Python, Journal of Machine Learning Research* [Machine Learning in Python, Journal of Machine Learning Research], 2011, 12, pp. 2825-2830.

9. *Popova T.P.* Ansambli modeley kak sovremennyy instrument analiza dannykh [Model ensembles as a modern tool for data analysis], responsible for the release: dr. of econ. sc., Rector of the Ural State University of Economics, 2017, 256 p.
10. *Shishmarev V.Yu.* Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: uchebnyk dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy [Reliability of technical systems: textbook for students of higher educational institutions]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2010, 304 p.
11. *Dyuk V.A., Fomin V.V.* Prognozirovaniye vremennykh ryadov na osnove metodov DataMining [Forecasting of time series based on DataMining methods], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2012, No. 13, pp. 108-111.
12. *Shakhanov N.I., Oskolkov V.M., Varfolomeev I.A., Yudina O.V.* Prognozirovaniye otkazov oborudovaniya na osnove algoritmov mashinnogo obucheniya [Forecasting of equipment failures based on machine learning algorithms], *Voprosy obrazovaniya i nauki. Po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 31 maya 2016* [Issues of education and science. Based on the materials of the international scientific and practical conference, May 31, 2016], pp. 315-317.
13. *Flakh P.* Mashinnoe obuchenie. Nauka i iskusstvo postroeniya algoritmov, kotorye izvlekayut znaniya iz dannykh [Machine learning. The science and art of building algorithms that extract knowledge from data]. Moscow: DMK Press, 2015, 402 p.
14. *Kormen T., Leyzerson Ch., Rivest R., Shtayn K.* Algoritmy: postroenie i analiz [Algorithms: construction and analysis]. 2nd ed.: transl. from engl. Moscow, 2005, 1296 p.
15. *Makkonnell Dzh.* Osnovy sovremennykh algoritmov [Fundamentals of modern algorithms]. 2nd ed. Moscow: Tekhnosfera, 2004, 368 p.
16. *Vadzinskiy R.N.* Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam [Handbook of probability distributions]. St. Petersburg, 2001.
17. *Chugreev V.L., Badanin D.A.* Ispol'zovaniye prognoznoy analitiki v informatsionno-analiticheskikh sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy [Using Predictive Analytics in Information and Analytical Systems for Decision Support], *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2016, No. 6, pp. 49-52.
18. *Lipatov M.* Pervyy v Rossii kompleks prediktivnoy analitiki dlya energeticheskogo i promyshlennogo oborudovaniya [The first predictive analytics complex for energy and industrial equipment in Russia], *Ekspozitsiya Neft' Gaz* [Expositsiya Neft Gas], 2016, No. 3 (49), pp. 82-83.
19. Prognoznaya analitika – sposob adaptatsii v novykh ekonomicheskikh realiyakh [Predictive analytics - a way to adapt to new economic realities]. Available at: <http://www.iksmedia.ru/articles/5292204-Prognoznaya-analitika-sposob-adapta.html>.
20. *Kobl Dzheymsi Baalis.* Ob'edineniye istochnikov dannykh dlya predskazaniya ostavshegosya sroka poleznogo ispol'zovaniya – avtomatizirovannyy metod dlya identifikatsii prognosticheskikh parametrov [Combining data sources to predict remaining useful life - an automated method for identifying prognostic parameters], 2010.

Кораблев Юрий Анатольевич – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: juri.korablev@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79213940822; кафедра автоматизации и процессов управления; доцент.

Korablev Yuri Anatol'evich – St. Petersburg state electrotechnical University named after V.I. Ulyanov (Lenin) SPbGETU "LETI"; e-mail: juri.korablev@gmail.com; Saint Petersburg, Russia; phone: +79213940822; the Department of Automation and Control Processes; associate professor.

УДК 004.067

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-155-163

А.С. Манна, Г.В. Муратова**РАЗРАБОТКА СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЯЖЕСТИ
ОСТЕОАРТРИТА КОЛЕННОГО СУСТАВА**

Предлагается метод автоматизированной оценки степени тяжести остеоартрита коленного сустава, основанный на применении современных методов машинного обучения, в частности, глубокой нейронной сети. Остеоартрит является одним из наиболее распространённых дегенеративных заболеваний суставов, и его своевременная диагностика является критически важной для эффективного лечения. Традиционные методы визуальной оценки рентгенографических снимков

коленного сустава имеют ряд ограничений, таких как субъективность и зависимость от опыта врача. В связи с этим разработка методов автоматизированного анализа медицинских изображений становится всё более актуальной. Остеоартрит коленного сустава – одно из самых распространенных и тяжелых дегенеративных заболеваний, ведущих к значительному снижению качества жизни пациентов. Традиционные методы диагностики остеоартрита, такие как визуальная оценка рентгенографических снимков, зависят от субъективного мнения специалиста и его опыта, что может приводить к вариациям в точности диагностики и своевременности выявления патологии. Поэтому разработка и внедрение методов автоматизированного анализа медицинских изображений имеет высокую актуальность и потенциальную клиническую ценность. В ходе данного исследования была разработана и обучена специализированная нейронная сеть на основе архитектуры ResNet-34, которая доказала свою высокую эффективность в решении задач компьютерного зрения. Нейронная сеть была модифицирована для включения двух параллельных ветвей, каждая из которых содержит спиральную линейную структуру и четыре скрытых слоя, предназначенных для более точного выделения области коленного сустава. Такая архитектура позволила не только идентифицировать область интереса с высокой точностью, но и оптимизировать функцию потерь в зависимости от специфики различных патологий, таких как разная степень поражения суставов, а также скорректировать влияние классового дисбаланса в данных, что часто становится проблемой при работе с медицинскими изображениями. Для повышения качества результатов нейронная сеть была обучена на двух независимых наборах данных, разделённых по половому признаку (мужчины и женщины). Это позволило улучшить общее качество рентгенографических изображений и снизить влияние шумов, которые могут возникать вследствие артефактов при радиальной визуализации. В процессе подготовки данных также была применена техника ImagePixelSpacing, позволяющая уточнять разрешение изображений до размеров 256×256 пикселей, что способствовало лучшей обработке деталей и структур коленного сустава. Обучение сети проводилось с использованием современных методов оптимизации, что позволило достичь высокой точности классификации. Для оценки эффективности предложенной модели использовался тест Каппа, который подтвердил достоверность определения базовых линий. Средняя точность, достигнутая моделью, составила 93,76% на основе результатов мультиклассового T-теста, что свидетельствует о её высоком потенциале для клинического применения. Более того, коэффициент AUC (площадь под кривой операционной характеристикой) составил 0,97, что значительно превышает показатели, достигнутые в предыдущих исследованиях в данной области. Предложенная модель демонстрирует высокую точность и надёжность в задаче автоматизированной оценки степени тяжести остеоартрита, что может стать значительным шагом вперед в области диагностики и мониторинга этого заболевания. Кроме этого эти результаты демонстрируют потенциал модели как надежного инструмента для автоматизированной оценки степени остеоартрита, способного не только улучшить точность диагностики, но и облегчить работу медицинских специалистов. Дальнейшие исследования могут включать адаптацию модели для анализа других суставов и интеграцию дополнительных функциональных возможностей, таких как прогнозирование прогрессирования заболевания на основе последовательных снимков.

Разработка, сверточная нейронная сеть; оценка тяжести остеоартрит; коленный сустав; машинное обучение; компьютерное зрение; медицинская диагностика; классификация изображений.

A.S. Manna G.V. Muratova

DEVELOPMENT OF A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK TO ASSESS THE SEVERITY OF KNEE OSTEOARTHRITIS

A method In this paper, we propose a novel method for the automated assessment of knee osteoarthritis severity, utilizing advanced machine learning techniques, specifically a deep neural network. Osteoarthritis is one of the most prevalent degenerative joint diseases, and its timely diagnosis is crucial for ensuring effective treatment. Traditional methods for visually assessing X-ray images of the knee joint present several limitations, including subjectivity and reliance on the experience of the clinician. Therefore, the development of automated medical image analysis techniques has become increasingly relevant. Osteoarthritis of the knee joint is one of the most common and severe degenerative diseases leading to a significant decrease in the quality of life of patients. Traditional methods of diagnosing osteoarthritis, such as visual assessment of X-ray images, depend on the subjective opinion of a specialist and his experience, which can lead to variations in the accuracy of diagnosis and timely detection of pathology. Therefore, the development and implementation of methods for automated analysis of medical images is highly relevant and has potential clinical value. In this study, we designed and trained a specialized neural network based on the ResNet-34 architecture, which has demonstrated significant effectiveness in solving computer vision problems. The network was modified to incorporate two parallel branches, each contain-

ing a spiral linear structure and four hidden layers. This design enables more precise identification of the knee joint area. Additionally, the architecture facilitates optimization of the loss function to account for varying pathological characteristics, such as different degrees of joint degradation, and to address the issue of class imbalance—a common challenge in medical imaging datasets. To further enhance model performance, the neural network was trained on two distinct datasets stratified by gender (male and female). This approach improved overall image quality and reduced the impact of noise introduced by artifacts during radiographic imaging. Moreover, we employed the ImagePixelSpacing technique during data preparation to standardize image resolution at 256×256 pixels, allowing for more accurate processing of fine details and structures within the knee joint. The network training employed state-of-the-art optimization techniques, resulting in a high level of classification accuracy. To evaluate the effectiveness of the proposed model, the Kappa test was utilized, confirming the reliability of baseline determinations. The model achieved an average accuracy of 93.76%, as demonstrated by the multiclass T-test, indicating its strong potential for clinical application. Additionally, the model's area under the curve (AUC) score was 0.97, surpassing the results reported in previous studies in this domain. In conclusion, this research contributes significantly to the field of medical informatics and computer-based medical image analysis by offering an innovative solution for the automated assessment of osteoarthritis. This method has the potential to profoundly improve diagnostic accuracy and treatment outcomes in clinical settings. In addition, these results demonstrate the potential of the model as a reliable tool for automated assessment of the degree of osteoarthritis, which can not only improve the accuracy of diagnosis, but also facilitate the work of medical specialists. Further research may include adapting the model to analyze other joints and integrating additional functionality, such as predicting disease progression based on sequential scans.

Development; convolutional neural network (CNN); assessment severity osteoarthritis; knee joint; machine learning; computer vision; medical diagnosis; image classification.

Введение. Остеоартрит коленного сустава является одним из наиболее распространенных дегенеративных заболеваний опорно-двигательного аппарата, влияющим на качество жизни миллионов людей по всему миру. Своевременная и точная оценка тяжести остеоартрита имеет важное значение для разработки эффективных стратегий лечения и предотвращения дальнейшего прогрессирования заболевания. Традиционные методы диагностики, такие как рентгенография и клинические осмотры, зависят от субъективных факторов и опыта специалиста, что может привести к вариациям в оценке.

Современные достижения в области искусственного интеллекта и компьютерного зрения, в частности использование сверточных нейронных сетей (CNN), открывают новые возможности для автоматизации процесса анализа медицинских изображений. Сверточные нейронные сети способны извлекать важные характеристики и паттерны из цифровых рентгеновских снимков, что делает их мощным инструментом для точной оценки тяжести остеоартрита.

Цель данной работы – разработка и внедрение сверточной нейронной сети для автоматизированного анализа рентгеновских изображений коленного сустава с целью определения степени остеоартрита. В ходе исследования будут рассмотрены подходы к обучению и тестированию сети, а также проведена оценка её точности и применимости в клинической практике.

В настоящее время актуальной задачей является построение экономичных и устойчивых алгоритмов для ранней диагностики остеоартрита (ОА) [1-5]. Эффективным методом такой диагностики является использование машинного обучения. Машинное обучение широко используется для улучшения качества медицинских изображений и их анализа для более точной диагностики. Остеоартрит является одним из наиболее распространенных заболеваний костей и может иметь много негативных последствий [6], если ее не выявить на ранней стадии. Ранняя диагностика заболевания ОА может быть проведена с помощью дорогостоящего аппарата МРТ [7]. Отсюда вытекает важность разработки метода, использующего нейронные сети, для анализа рентгенографических изображений и диагностики заболеваний, поскольку устройства для рентгенографической визуализации доступны и недороги [8, 9].

В этой статье мы предлагаем метод автоматической оценки тяжести ОА коленного сустава. Разрабатывается и обучается эффективная нейронная архитектура для изучения особенностей заболевания и демонстрации получаемых результатов при таком заболева-

нии. Для исследований была использована сеть RESNET-34 [10, 11], состоящая из двух ветвей, каждая из которых содержит спиральную линейную канавку и четыре скрытые сети, для идентификации области колена, настройки функции ошибок в соответствии с потребностями при различных заболеваниях и устранения проблемы классового дисбаланса [12, 13], как показано на рис. 1.

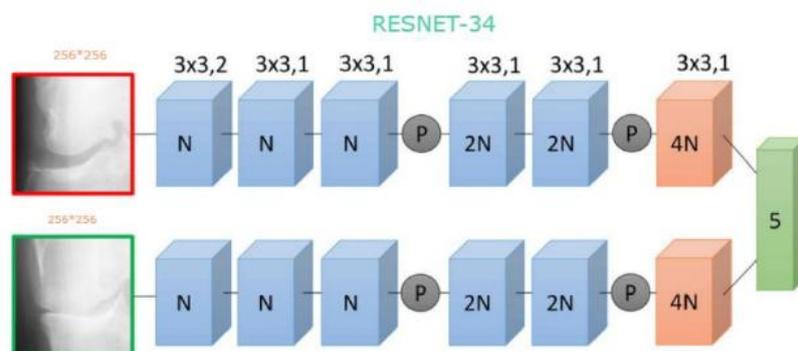


Рис. 1. Схематическое представление архитектуры предлагаемой сети RESNET-34

Постановка задачи. Остеоартрит коленного сустава (ОАКС) — это хроническое дегенеративное заболевание, которое вызывает разрушение суставного хряща и изменение подлежащей костной ткани, приводя к боли, скованности и ограничению подвижности. Диагностика и оценка тяжести ОАКС обычно основаны на радиологических изображениях и клинических симптомах, что требует значительных временных и профессиональных ресурсов. Введение методов машинного обучения и, в частности, сверточных нейронных сетей (СНС) предлагает перспективные возможности для автоматизации этого процесса, что может улучшить точность и эффективность диагностики.

Цель данного исследования заключается в разработке и валидации модели сверточной нейронной сети для автоматической оценки тяжести остеоартрита коленного сустава на основе радиологических изображений (рентгеновских снимков).

Решение поставленной задачи. В настоящее время существует ряд систем для решения проблем, связанных с остеоартритом коленного сустава. В работе [14] авторами предложена автоматизированная система для классификации и диагностики остеоартрита коленного сустава (ОА), использующую как общие признаки пациента (такие как возраст, пол и оценка исходов травмы колена и остеоартрита (KOOS)), так и кинематические данные, собранные на протяжении всего цикла ходьбы. Система включает в себя различные конструкции сверточных нейронных сетей (CNN), выявляя четкие различия между классами, несмотря на ограниченный размер выборки, что ограничивало практические выводы [15, 16].

В исследовании [17, 18] был представлен метод автоматической идентификации ОА коленного сустава, основанный на кинетике тела. Этот метод был апробирован на выборке из 94 человек, распределенной поровну между 47 пациентами с ОА и 47 здоровыми пациентами контрольной группы, что позволило достичь общей точности $72,61\% \pm 4,24\%$.

Другой подход предполагал использование деревьев решений с многослойными перцептронами (MLP) на листьях деревьев, как было предложено в [19]. Участники были классифицированы в соответствии со шкалой Келлгрена-Лоуренса как “нормальные”, “легкие”, “умеренно выраженные” или “тяжелые” в зависимости от тяжести симптомов, в результате чего средняя точность составила 80%.

В работе [20] авторы успешно продемонстрировали свой подход, сосредоточив внимание на методах искусственных нейронных сетей, выходящих за рамки глубокого обучения, для улучшения диагностики заболеваний коленного сустава. В [21] предложен

метод компьютерной диагностики для раннего выявления ОА коленного сустава с использованием рентгенографии коленного сустава и нескольких методов машинного обучения, что позволили достигнуть показателя точности в 87,15%.

В [22] авторами проведено исследование с использованием объединенных данных из базового набора базы данных ОАI. Было протестировано 2300 изображений примерно у 1200 испытуемых. Исследование показало, что точность повышалась при использовании комбинированного набора данных как для тестирования, так и для обучения, а не только при использовании набора данных ОАI.

В [23] описана управляемая данными платформа на основе МРТ, использующую T2-картирование для диагностики ОА коленного сустава, что еще больше продвинуло эту область за счет инновационных методик глубокого обучения.

В данном исследовании предложен новый алгоритм автоматической оценки тяжести остеоартрита коленного сустава. Остеоартрит коленного сустава подразделяется на три категории: здоровое состояние, средней тяжести и тяжелое. Задача классификации выполняется с использованием предложенной модели VGG16 для ResNet-34 и архитектуры обучения переносу (InceptionResNet V2). Набор данных, использованный в этом исследовании, содержит 5201 изображение остеоартрита коленного сустава, которое разделено на наборы данных для обучения, тестирования и валидации. В частности, 3100 изображений были использованы для обучения, 1500 – для тестирования и 601 – для валидации [24, 25].

Современные методы диагностики остеоартрита коленного сустава требуют применения передовых технологий для повышения точности и надежности оценки. Остеоартрит остается одной из наиболее распространенных причин хронической боли и инвалидности среди взрослого населения, что подчеркивает важность своевременной и точной диагностики. Для решения этой проблемы активно используются методы глубокого обучения и, в частности, сверточные нейронные сети (CNN).

Таким образом, многочисленные исследования подтверждают, что глубокие нейронные сети, включая модифицированные архитектуры, такие как ResNet и U-Net, обеспечивают значительное улучшение в точности диагностики и автоматическом анализе медицинских изображений.

Разработанная модель включает в себя два различных набора слоев. Первый набор, предназначенный для извлечения объектов из входного объема, называется средством извлечения объектов. Второй набор слоев включает полностью связанные слои, которые выполняют задачи извлечения объектов и прогнозирования класса, и называется классификатором. Как показано на рисунке 2, средство извлечения объектов заимствовано из предварительно обученных моделей. Оно включает средний объединяющий слой перед тремя полностью связанными слоями (с выходными данными 128, 32 и 2 соответственно), с конечным выводом для двух классов и SoftMax-слоем. За первыми двумя полностью связанными слоями следуют слой повторного соединения и слой отсева с коэффициентом 0.5.

Перед обучением модели изображения были предварительно обработаны путем изменения их размера до 256 x 256 пикселей, а набор данных был повторно масштабирован путем нормализации. Оптимизатор Adam был использован для обучения модели в течение 100 периодов времени с размером пакета в 16 единиц. Во время обучения производительность модели оценивалась с использованием показателей точности (accuracy), достоверность (precision), отклика (recall), F1-score.

Далее обученная модель была протестирована на тестовом наборе, были оценены показатели производительности, чтобы определить эффективность модели в выявлении трех категорий остеоартрита коленного сустава.

Нейронная сеть была обучена на двух наборах данных для женщин и мужчин для улучшения рентгенографических изображений и устранения шума, возникающего в результате радиальных изображений. Затем изображение коленного сустава было уточнено с использованием техники `imagerpixelspacing` с размером 256×256, как показано на рис. 2.

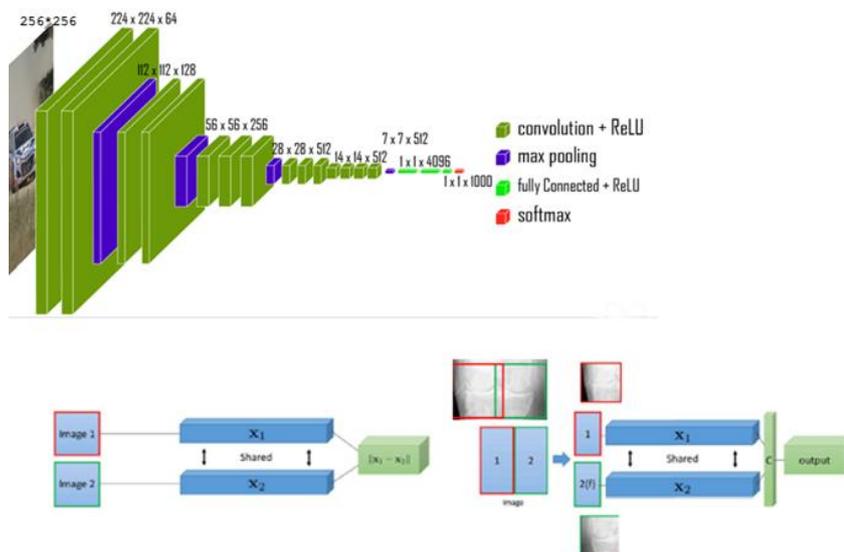


Рис. 2. Разработанная модель автоматической оценки тяжести остеоартрита



Рис. 3. Матрица ошибок для классификации KL

На рис. 3 представлена матрица ошибок, полученная на основе предложенной модели. Эта матрица отображает значения истинных положительных результатов, истинных отрицательных результатов, ложных положительных результатов и ложноотрицательных результатов. На основе этих значений можно получить такие показатели производительности, как точность, достоверность, и показатель F1. Матрицы ошибок, как правило, представляют собой всеобъемлющий и информативный метод оценки эффективности классификационной модели и должны использоваться наряду с другими оценочными мерами. Как показано на рис. 3, матрица ошибок предлагаемой модели показывает оптимальные результаты.

Средняя точность мультиклассового Т-теста, достигнутая разработанной моделью, составила 93,76%, а коэффициент AUC оказался на 0,97 выше, чем у любых ранее проведённых исследований, как показано на рис. 4.

```

Classification Report:
-----
              precision    recall  f1-score   support

   Healthy      0.9723      0.9603      0.9663      1387
   Moderate     0.7220      0.8386      0.7759       223
   Severe       0.9375      0.5882      0.7229        51

 accuracy              0.9326      1661
 macro avg           0.8773      0.7957      0.8217      1661
 weighted avg        0.9376      0.9326      0.9332      1661

```

Рис. 4. Результат классификации

Предложенный метод был сравнен с другими методами и обеспечил точность 0.864, более высокую, чем у остальных, лучший коэффициент F1 и AUC, а также более высокую производительность, что показано в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение значений показателей производительности с другими архитектурами

Модели	Balanced accuracy	F1 score	AUC
ResNet18 (TL)	0.811	0.928	0.945
ResNet34 (TL)	0.883	0.872	0.925
DenseNet121(TL)	0.76	0.78	0.913
VGG11 (TL)	0.77	0.854	0.925
VGG19 (TL)	0.833	0.865	0.908
VGG16 (scratch)	0.843	0.846	0.891
Предложенный метод	0.971	0.9326	0.9326

Параметры производительности используются для оценки эффективности моделей машинного обучения. В табл. 1 представлены результаты использования различных моделей машинного обучения: ResNet18 (TL), ResNet34 (TL), плотной сети 121 (TL), VGG11 (TL), VGG19 (TL), VGG16 (scratch) и предлагаемой модели для классификации различных уровней тяжести заболевания в наборе медицинских данных.

Модели протестированы на трех различных классах тяжести заболевания: тяжелое, нормальное (у здоровых людей), средней тяжести.

Согласно данным таблицы, предложенная модель CNN превосходит две другие модели по всем оценочным показателям, обеспечивая высочайшую точность, чувствительность, оценку F1 и достоверность для всех классов тяжести заболевания. В частности, разработанная модель демонстрирует высокую точность, чувствительность, оценку F1 и достоверность для тяжелого типа заболевания, а также очень высокие показатели для других классов, что свидетельствует о её эффективности в точной классификации уровней тяжести заболевания.

Заключение. Рассмотрены проблемы диагностики артрита коленного сустава – хронического дегенеративного заболевания, которое поражает колено, вызывая боль.

Предложенная модель, разработанная авторами исследования, достигла точности в 97%, что превосходит показатели других моделей. Эта модель позволяет врачам быстро и точно классифицировать тяжесть остеоартрита у пациентов на основе отдельных изображений. Кроме того, предложенная модель позволила достичь самых современных результатов по сравнению с существующими моделями, что делает ее ценным инструментом для точной и эффективной диагностики и планирования лечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang Y., Wang X., Gao T., Du L. and Liu W. An automatic knee osteoarthritis diagnosis method based on deep learning: data from the osteoarthritis initiative, *Journal of Healthcare Engineering*, 2021, pp. 1-10. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/5586529>.

2. Tolpadi A.A., Lee J.J., Pedoia V. and Majumdar S. Deep learning predicts total knee replacement from magnetic resonance images—scientific reports, 2020, 10 (1), pp. 6371. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63395-9>.
3. Kokkoti S., Moustakidis S., Papageorgiou E., Giakas G. and Tsaopoulos D.E. Machine learning in knee osteoarthritis: a review, *Osteoarthritis and Cartilage Open*, 2020, 2 (3), pp. 100069. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ocarto.2020.100069>.
4. Guan B., Liu F., Mizaian A.H., Demehri S., Samsonov A., Guermazi A. and Kijowski R. Deep learning approach to predict pain progression in knee osteoarthritis, *Skeletal radiology*, 2022, pp. 1-11.
5. Yeoh P.S.Q., Lai K.W., Goh S.L., Hasikin K., Hum Y.C., Tee Y.K. and Dhanalakshmi S. The emergence of deep learning in knee osteoarthritis diagnosis, *Computational intelligence and neuroscience*, 2021, pp. 1-20. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/4931437>.
6. Kim D.H., Lee K.J., Choi D., Lee J.I., Choi H.G. and Lee Y.S. Can additional patient information improve the diagnostic performance of deep learning for the interpretation of knee osteoarthritis severity, *Journal of Clinical Medicine*, 2020, 9 (10), pp. 3341. Available at: <https://doi.org/10.3390/jcm9103341>.
7. Ahmed S.M. and Mstafa R.J. A comprehensive survey on bone segmentation techniques in knee osteoarthritis research: from conventional methods to deep learning, *Diagnostics*, 2022, 12 (3), pp. 611. Available at: <https://doi.org/10.3390/diagnostics12030611>
8. Kotti M., Duffell L.D., Faisal A.A. and McGregor A.H. Towards automatically assessing osteoarthritis severity by regression trees & SVMs, 2013.
9. Kotti M., Duffell L.D., Faisal A.A. and McGregor A.H. Detecting knee osteoarthritis and its discriminating parameters using random forests, *Medical engineering & physics*, 2017, 43, pp. 19-29. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2017.02.004>.
10. Köktaş N.Ş., Yalabik N., Yavuzer G. and Duin R.P. A multi-classifier for grading knee osteoarthritis using gait analysis // *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31 (9), pp. 898-904. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2010.01.003>.
11. de Dieu Uwiseneyimana J. and Ibrikci T. Diagnosing knee osteoarthritis using artificial neural networks and deep learning, *Biomedical Statistics and Informatics*, 2017, 2 (3), pp. 95.
12. Brahim A., Jennane R., Riad R., Janvier T., Khedher L., Toumi H. and Lespessailles E. A decision support tool for early detection of knee OsteoArthritis using X-ray imaging and machine learning: data from the osteoarthritis initiative, *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2019, 73, pp. 11-18. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2019.01.007>.
13. Antony J., McGuinness K., Moran K. and O'Connor N.E. 2017. Automatic detection of knee joints and quantification of knee osteoarthritis severity using convolutional neural networks, *In Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition: 13th International Conference, MLDM 2017, New York, NY, USA, July 15-20, 2017, Proceedings 13*. Springer International Publishing, 2017, pp. 376-390. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62416-7_27.
14. Pedoia V., Lee J., Norman B., Link T.M. and Majumdar S. Diagnosing osteoarthritis from T2 maps using deep learning: an analysis of the entire Osteoarthritis Initiative baseline, 2019.
15. Pedoia V., Lee J., Norman B., Link T.M. and Majumdar S. Diagnosing osteoarthritis from T2 maps using deep learning: an analysis of the entire Osteoarthritis Initiative baseline cohort, *Osteoarthritis and cartilage*, 2019, 27 (7), pp. 1002-1010. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joca.2019.02.800>.
16. Chan S, Dittakan K. Osteoarthritis stages classification to human joint imagery using texture analysis: A comparative study on ten texture descriptors, *Recent Trends in Image Processing and Pattern Recognition*, 2019, pp. 209-225.
17. Antony J, McGuinness K, Moran K, O'Connor N. Automatic detection of knee joints and quantification of knee osteoarthritis severity using convolutional neural networks, *Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition (MLDM)*, 2017, pp. 376-390.
18. Tiulpin A., Thevenot J., Rahtu E., Lehenkari P., Saarakkala S. Automatic knee osteoarthritis diagnosis from plain radiographs: A deep learning-based approach, *Sci Rep*, 2018, 8, 1727.
19. Pingjun C., Linlin G., Xiaoshuang S., Kyle A., Lin Y. Fully automatic knee osteoarthritis severity grading using deep neural networks with a novel ordinal loss, *Comput Med Imaging Graph*, 2019, 75, pp. 84-92.
20. Hu J., Shen L., Sun G. Squeeze-and-excitation networks, *2018 IEEE/CVF Conf on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 7132-7141.
21. Tiulpin A., Saarakkala S. Automatic grading of individual knee osteoarthritis features in plain radiographs using deep convolutional neural networks, *Osteoarthr Cartil*, 2020, 28 (1): S308. DOI: 10.1016/j.joca.2020.02.480.
22. Norman B., Pedoia V., Noworolski A. Applying densely connected convolutional neural networks for staging osteoarthritis severity from plain radiographs, *J Digit Imaging*, 2019, 32, pp. 471-477.
23. Huang G., Liu Z., Weinberger KQ. Densely connected convolutional networks. *IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, 8, pp. 2261-2269.

24. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition, *IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770-778.
25. Kwon S.B., Han H., Lee M.C., Kim H.C. Machine learningbased automatic classification of knee osteoarthritis severity using gait data and radiographic images. *IEEE Access*, 2020, 8, pp. 120597-120603.

Маннаа Али Саж – Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича; e-mail: ali88manna@gmail.com; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 89034338358; кафедра информатики и вычислительного эксперимента; аспирант.

Муратова Галина Викторовна – e-mail: muratova@sfnedu.ru; тел.: 89282262429; кафедра информатики и вычислительного эксперимента; д.ф.-м.н.; профессор.

Manna Ali Sajae – Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences; e-mail: ali88manna@gmail.com; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79034338358; the Department of Informatics and Computational Experiment; postgraduate student.

Muratova Galina Viktorovna – e-mail: muratova@sfnedu.ru; phone: +79282262429; the Department of Informatics and Computational Experiment; dr. of phys. and math. sc.; professor.

Раздел III. Вычислительные и информационно-управляющие системы

УДК 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-164-176

В.М. Глушань, Л.А. Попов, А.А. Целых

О РЕАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УМНОЖЕНИЯ МАТРИЦ БОЛЬШИХ РАЗМЕРНОСТЕЙ

*Потребности практики постоянно требуют повышения производительности вычислительных систем. Достаточно долгое время основным путём построения вычислительных систем сверхвысокой производительности были многопроцессорные системы. При создании таких систем возникает много сложных проблем. Они связаны с необходимостью распараллеливания вычислительного процесса для эффективной загрузки процессоров системы, преодолением конфликтов при попытках нескольких процессоров использовать один и тот же ресурс системы, уменьшением влияния конфликтов на производительность системы и т.д. С преодолением микроэлектроникой рубежа в миллиард транзисторов на кристалле кремния, появилась новая парадигма многоядерности процессоров. Одновременно с этим возникла проблема соотношения многоядерности и многопоточности в современных вычислителях. Это связано с дилеммой предпочтения между ними. Многоядерный процессор содержит два и более электронных вычислительных ядра, размещённых на одном полупроводниковом кристалле. Каждое ядро многоядерного процессора является полноценным микропроцессором. Многоядерность является очевидным и традиционным методом распределенного решения многих сложных задач. Но этого нельзя сказать о многопоточности, которая опирается на использование очень быстрой кэш-памяти, связанной с основной памятью и служащей для уменьшения среднего времени доступа к основной памяти процессора. Относительная новизна современных подходов к построению вычислительных систем требует сравнительных экспериментальных исследований их возможностей. Перспективным и удобным математическим объектом для этих целей является распределенное умножение матриц больших размерностей. В статье приводятся практические результаты распределенного умножения квадратных матриц с размерами от 300*300 до 2000*2000 и случайно сгенерированными значениями элементов в матрицах в диапазоне от -100 до +100. Исходя из экспериментальных данных, представленных в соответствующих таблицах и графиках, получены гиперболические соотношения для зависимости времени умножения матриц от числа виртуальных машин (ядер) в используемом ноутбуке. Аналогичные результаты получены при умножении квадратных матриц на однопроцессорных компьютерах, подключённых к локальной сети. Аналитические выражения в этом случае также представляют гиперболические временные зависимости. Но численные значения в них существенно превосходят таковые для гиперболической формулы, полученной для ноутбука. Исходя из полученных результатов, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что использование однопроцессорного вычислителя, подключенного к локальной сети, для умножения матриц больших размерностей уступает быстрдействию ноутбука. Это связано со значительными затратами времени перемещения данных по локальной сети.*

Матрицы; одноядерный и многоядерный процессор; многоядерность; многопоточность; гиперболическая зависимость.

V.M. Glushan, L.A. Popov, A.A. Tselykh

ABOUT THE REAL POSSIBILITIES OF MODERN COMPUTING SYSTEMS FOR DISTRIBUTED MULTIPLICATION OF LARGE-DIMENSIONAL MATRICES

The needs of practice constantly require improving the performance of computing systems. For quite a long time, multiprocessor systems have been the main way to build ultra-high performance computing systems. When creating such systems, many difficult problems arise. They are related to the need to

*parallelize the computing process in order to efficiently load the system processors, overcome conflicts when several processors try to use the same system resource, reduce the impact of conflicts on system performance, etc. With microelectronics overcoming the milestone of a billion transistors on a silicon chip, a new paradigm of multicore processors has emerged. At the same time, the problem of the ratio of multicore and multithreading in modern computers arose. This is due to the dilemma of preference between them. A multicore processor contains two or more electronic computing cores placed on a single semiconductor crystal. Each core of a multicore processor is a full-fledged microprocessor. Multicore is an obvious and traditional method of distributed solution of many complex tasks. But this cannot be said about multithreading, which relies on the use of very fast cache memory associated with the main memory and serves to reduce the average access time to the main memory of the processor. The relative novelty of modern approaches to the construction of computing systems requires comparative experimental studies of their capabilities. A promising and convenient mathematical object for these purposes is the distributed multiplication of matrices of large dimensions. The article presents practical results of distributed multiplication of square matrices with sizes from 300*300 to 2000*2000 and randomly generated values of elements in the matrices in the range from -100 to +100. Based on the experimental data presented in the corresponding tables and graphs, hyperbolic relations are obtained for the dependence of the matrix multiplication time on the number of virtual machines (cores) in the laptop used. Similar results were obtained by multiplying square matrices on single-processor computers connected to a local network. Analytical expressions in this case also represent hyperbolic time dependencies. But the numerical values in them significantly exceed those for the hyperbolic formula obtained for the laptop. Based on the results obtained, the conducted research allows us to conclude that the use of a single-processor computer connected to a local network for multiplying matrices of large dimensions is inferior to the performance of a laptop. This is due to the significant time spent moving data over the local network.*

Matrices; single-core and multi-core processor; multicore; multithreading; hyperbolic dependence.

Введение. Принято считать, что эра компьютеризации началась в 1975 году, когда фирма MITS (Micro Instrumentation and Telemetry Systems) выпустила в свет первый персональный компьютер «Альтаир 8800». Это стало толчком для все увеличивающегося выпуска новых операционных систем, дисководов для оперативной записи и считывания информации с большого многообразия дисков. Компьютеризация стала шагать по планете с невиданной скоростью. В 1983 году появился первый удобный в использовании ПК Apple Macintosh. Наша страна тоже старалась не отставать, выпустив первый отечественный ПК «АГАТ».

Потребности практики постоянно требовали повышения производительности вычислительных систем. Достаточно долгое время основным путём построения вычислительных систем сверхвысокой производительности были многопроцессорные системы [1, 2]. При создании таких систем возникает много сложных проблем, связанных с необходимостью распараллеливания вычислительного процесса (программ) для эффективной загрузки процессоров системы, преодолением конфликтов при попытках нескольких процессоров использовать один и тот же ресурс системы (например, некоторый модуль памяти), уменьшением влияния конфликтов на производительность системы и т.д.

На рубеже тысячелетий, когда микроэлектроника преодолела рубеж в миллиард транзисторов на кристалле кремния, появилась новая парадигма многоядерности процессоров. Практически одновременно возникла проблема соотношения многоядерности и многопоточности в современных вычислителях. Это связано с дилеммой предпочтения между ними.

Считается, что широкое распространение многоядерная архитектура получала лишь в 2005 году, когда компании AMD и Intel выпустили свои первые двухъядерные процессоры. Многоядерный процессор содержит две и более электронные вычислительные схемы. Эти схемы называют ядрами и размещают их на одном полупроводниковом кристалле или в одном корпусе. Каждое ядро многоядерного процессора является полноценным микропроцессором, для которого характерны черты всех современных процессоров.

Если многоядерность является очевидным и традиционным методом распределенного решения многих сложных задач, то этого нельзя сказать о многопоточности. Многопоточность опирается на использование очень быстрой кэш-памяти (сверх оперативной памяти), связанной с основной памятью и служащей для уменьшения среднего вре-

мени доступа к основной памяти процессора. Кэш-память хранит копии часто используемых данных из основной памяти. Если большая часть запросов в основную память будет обрабатываться посредством использования кэш-памяти, то средняя задержка обращения к основной памяти будет определяться задержкой именно кэш-памяти, а не основной памяти [3].

Парадигма многопоточности стала очень привлекательной для многих производителей процессоров. Поэтому многие производители многопоточных процессоров в рекламных целях акцентируют внимание потребителей на максимальном суммарном числе потоков в их процессорах. И нередко многочисленные потоки представляются как «логические процессоры» или «виртуальные ядра» [4].

Следует заметить, что многопоточность не всегда приводит к положительному эффекту. А он проявляется лишь тогда, когда все исполняемые ядром вычислителя потоки принадлежат одной и той же программе. Но это возможно лишь при условии слабой взаимозависимости потоков по данным. А это значит, что запуск нескольких программ разными потоками на одном ядре может лишь ухудшить ситуацию из-за постоянных конфликтов в кэшах. «Поэтому нет ничего удивительного в том, что нередко при решении на многопоточном процессорном ядре тестовых задач, запрограммированных для разного числа потоков, самая высокая производительность ядра достигалась при работе с одним единственным потоком» [5].

В добавление ко всему следует отметить, что параллельные вычисления наталкиваются на ограничения, обусловленные законом Амдала [6–9], предложенного им в 1967 году. До сих пор в специализированной литературе по параллельным вычислениям этот закон является основополагающим. Он определяет теоретическое ограничение для скорости выполнения некоторой предназначенной для этого программы при распараллеливании процесса решения соответствующей задачи.

В завершение вводной части настоящей статьи для её читателей будет интересен, по нашему мнению, многозначный вывод из [10]: «Изготовители процессоров иногда рекламируют многопоточность своих изделий как альтернативу многоядерности, поток не эквивалентен процессорному ядру и тем более процессору, а многопоточность не заменяет многоядерность. В результате на рынке представлены процессорные ядра с разным числом потоков. Есть и примеры принципиального игнорирования многопоточности. Если многопоточность – не замена многоядерности, то многоядерность во многих случаях может успешно заменить многопоточность. Она более универсальна, поскольку применима для распараллеливания и потоков одной задачи, и целиком задач».

Экспериментальные исследования умножения матриц больших размерностей на двух типах вычислительных систем. Умножение матриц используется во многих практических задачах. При умножении матриц небольших размерностей особых трудностей не возникает. Они появляются, когда приходится умножать матрицы с тысячами и миллионами строк и столбцов. Умножение матриц является той областью вычислений, которая позволяет эффективно использовать все вычислительные ресурсы современных процессоров.

В [11] отмечается, что «распределенные вычислительные системы – это сформировавшаяся сфера высокопроизводительных вычислений, обладающая своей спецификой, ярко выраженным классом решаемых задач и методами их решения. Разрабатываются и внедряются новые концепции построения распределенных систем, расширяется круг решаемых ими задач, упрощается процесс организации, разрабатываются более простые методы использования ресурсов конечными пользователями».

В качестве примера достаточно обратиться к статьям [12–15], в которых рассматриваются вопросы оптимального блочного разбиения исходных матриц и их умножение на заданном числе процессоров. Отличие указанных статей от всех известных работ носит двойственный характер. Во-первых, речь идет об умножении не квадратных, а о матрицах более общего вида – прямоугольных согласованных матрицах. Во-вторых, рассматривается вопрос об наилучшем (оптимальном) разбиении таких матриц на блоки и соответствующее их умножение на заданном числе процессоров.

В указанных работах вычислительные процессы были ориентированы на использование однопроцессорных клиент-серверных технологий. В настоящей статье приводятся сравнительные результаты умножения квадратных матриц на компьютере (ноутбуке) с многоядерным процессором и на нескольких однопроцессорных компьютерах, подключенных к локальной сети.

Экспериментальные результаты умножения квадратных матриц на ноутбуке с многоядерным процессором. Для распределённого умножения был разработан код программы [16] на языке Java. Используя данную программу проведены экспериментальные исследования умножения квадратных матриц на одном многоядерном процессоре [17]. В процессе экспериментов измерялось время умножения матриц в зависимости от числа задействованных в процессоре ядер. Цель эксперимента заключалась в практическом определении эффективности использования многоядерного процессора при умножении квадратных матриц. Следует отметить, что предварительные результаты экспериментов при одних и тех же исходных данных имели некоторый дрейф. Поэтому с целью исключения его влияния на точность экспериментов замеры времени вычислений для одних и тех же исходных данных проводились многократно, а затем усреднялись. О целесообразности применения такой рекомендации в проведении экспериментов с применением многоядерных процессоров рекомендована и в работе [18].

В экспериментах использовался ноутбук со следующими характеристиками:

- операционная система Windows 10;
- процессор AMD Ryzen 5 Mobile 4600H: 6 ядер (12 логических процессоров) [19];
- оперативная память 40 Гбайт, 3200 МГц.

Для эмуляции работы программы на одном компьютере было использовано средство виртуализации Oracle VM Virtual Box версии 7.0.12. В эксперименте было задействовано 5 виртуальных машин со следующими параметрами:

- операционная система Windows 10;
- одно ядро процессора (2 логических процессора);
- оперативная память 4 Гбайт, 3200 МГц.

Для перемножения использовались две случайно сгенерированные целочисленные матрицы размером 300×300 . Значения отдельных элементов матриц находились в диапазоне $-100 < x < 100$.

В процессе проведения эксперимента учитывалось время всего процесса перемножения. Здесь нужно заметить, что временем разбиения матриц на блоки, переноса данных по виртуальной сети и построения результирующей матрицы из блоков можно пренебречь, поскольку оно занимает значительно меньше времени, чем время процесса собственно умножения.

В процессе выполнения эксперимента гостевая машина выполняла роль сервера, а виртуальные машины – роль клиентов. В задачи сервера входило разбиение исходных матриц на блоки, передача полученных блочных столбцов и строк на клиенты, получение результирующих блоков с клиентов и построение результирующей матрицы. Перемножение блоков на гостевую машину (сервер) не возлагалось. Клиенты получали блочные строки и столбцы с сервера, выполняли вычисление своего блока и отправляли полученный результат обратно серверу.

На k -ой итерации эксперимента было задействовано k клиентов и один сервер. Таким образом, в первой итерации участвовали гостевая машина и одна виртуальная, на втором – гостевая и две виртуальные, и т.д. Всего было проведено 5 итераций. При этом на каждой итерации было произведено 5 замеров времени, а затем вычислено его среднее значение. Результаты экспериментов приведены в табл. 1

Таблица 1

Число серверов	Общее время выполнения (мс)					
	1	2	3	4	5	Среднее
1	79	115	93	79	91	91,4
2	65	53	57	52	55	56,4
3	47	50	42	49	42	46
4	45	44	40	39	41	41,8
5	39	40	39	36	41	39

Графические результаты приведены на рисунке 1. На оси абсцисс указано число задействованных виртуальных машин (ядер). Оно совпадает с номером итерации эксперимента, но на единицу меньше числа задействованных в эксперименте ядер процессора. На оси ординат указано среднее время умножения матриц в миллисекундах.

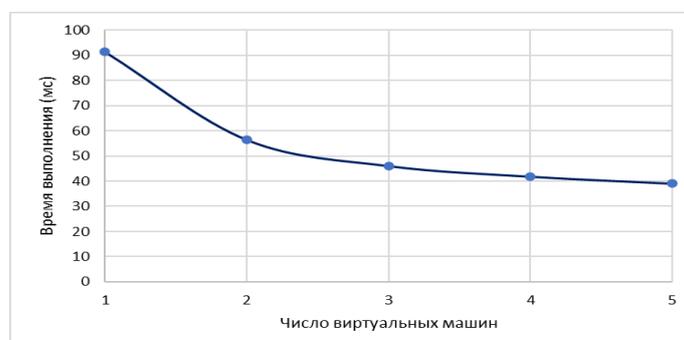


Рис. 1. Изменение времени умножения матриц от числа виртуальных машин

Используя метод гиперболической регрессии [20], получена формула зависимости времени умножения $f(x)$ от числа задействованных виртуальных машин x

$$f(x) = 24,78 + \frac{66,01}{x} \quad (1)$$

Статистические характеристики (коэффициент корреляции – КК и коэффициент детерминации – R^2) для формулы (1) принимают соответственно значения: КК = 0,9989, $R^2 = 0,9977$. Эти значения свидетельствуют о высокой степени согласованности формулы (1) с экспериментальными данными.

Полученные результаты показывают, что увеличение числа задействованных в экспериментах ядер процессора имеет смещенную на постоянную величину обратно пропорциональную зависимость (гиперболическую) уменьшения времени распределённого умножения матриц. Постоянная величина (const) 24,78 в приведенной формуле вызвана неизбежными, но экспериментально трудно и однозначно учитываемыми накладными расходами в решении задачи.

Как с теоретической, так и практической точек зрения интерес представляет зависимость времени умножения матриц от числа процессоров (виртуальных машин), рассчитанных по формуле (1) как без учета, так и с учетом постоянной составляющей. В этом случае эта зависимость, являясь идеализированной, будет показывать в «размах» увеличение быстроедействия в зависимости от использованного числа ядер. Эти результаты приведены в табл. 2, исходя из анализа табл. 1

Таблица 2

№	Среднее значение эксперимента	Расчётное значение времени по формуле (1) без const	В размах без const	Расчётное значение времени по формуле (1) с const	В размах с const
1	91,4	65,9	1,0	90,76	1,0
2	56,4	32,95	2,0	57,81	1,57
3	46,0	21,96	3,0	46,82	1,93
4	41,8	16,48	4,0	41,34	2,19
5	39,0	13,18	5,0	38,68	2,34

Наиболее вероятной предполагаемой причиной появления постоянной составляющей является использование в современных многоядерных процессорах кэш-памяти (быстрой). Её использование объясняется тем, что оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) работает гораздо медленнее, чем арифметическое устройство (АУ) процессора. Это приводит к тому, что АУ часто оказывается в состояниях ожидания прихода из ОЗУ нужных для обработки данных. Для предотвращения простоев в полупроводниковый кристалл АУ встраивается дополнительная быстрая, так называемая кэш-память. Она является буфером между ОЗУ и процессором и предназначена для хранения данных, с которыми процессор должен работать в текущий момент времени. Таким образом, кэш-память сглаживает разницу в скорости работы АУ и ОЗУ. Благодаря этому в целом вычисления производятся быстрее, чем это было бы без применения кэш-памяти.

Однако полностью исключить простои невозможно, но их желательно свести к минимуму. Это достигается использованием в системе процессорного кэша специального контроллера. Основная задача контроллера состоит в минимизации числа простоев АУ. Для этого контроллер должен уметь предсказывать ситуации для своевременного считывания из ОЗУ необходимых данных для их обработки в АУ. Этот процесс называется «интеллектуальной стратегией кэширования», которая основана на анализе уже имеющихся ошибок. Эта стратегия строится на основе искусственного интеллекта, позволяющего контроллеру заблаговременно определить, какие данные могут понадобиться АУ. Если он «угадал», то запоминает это событие как удачное, если не «угадал», то бракует его, и меняет логику выбора данных для предварительной загрузки.

Экспериментальные результаты умножения квадратных матриц на однопроцессорных компьютерах, подключённых к локальной сети. Эксперименты проводились с однотипными компьютерами Intel Core i3-10100 3.6 ГГц/4 ядра/ОЗУ 8 Гб/SSD 240 Гб/ОС Windows 10, которые были подключены к локальной сети Ethernet со скоростью 1 Гбит/с. Всего в экспериментах использовалось 6 компьютеров.

При этом ставилась задача проведения двух типов экспериментов. В эксперименте №1 осуществлялось умножение матриц в локальной сети с использованием только одного сервера (процессора). Использовались случайно сгенерированные квадратные матрицы размерностью от 300×300 до 900×900 . Этот эксперимент должен был дать ответ на вопрос о быстродействии процесса блочного умножения матриц больших размерностей для случая, когда один из процессоров исполнял роль сервера (ведущего), а остальные 5 процессоров (ведомые серверы) выполняли умножение соответствующих блоков исходных матриц. Сервер (ведущий) выполнял задачу разбиения исходной матрицы на блоки, передачу их на 5 ведомых процессоров и осуществлял сборку результирующей матрицы.

В эксперименте №2 выполнялось умножение матриц в локальной сети с использованием от одного до 5 серверов. Один из серверов использовался в качестве управляющего. Для реализации процесса умножения были случайно сгенерированы квадратные матрицы размерностью 2000×2000 . Как и в эксперименте с ноутбуком значения отдельных элементов матриц находились в диапазоне $-100 < x < 100$.

Результаты эксперимента № 1. Табл. 3 результатов зависимости общего времени выполнения операции умножения (включая время на разбиение матриц на блоки и сборки результирующей матрицы, время на передачу данных (блоков) по сети и время на собственно умножения матриц) от размерности матриц имеет вид

Таблица 3

Размерность	Общее время выполнения (мс)					
	1	2	3	4	5	Среднее
300	187	171	484	484	484	362
400	312	593	609	624	629	553,4
500	796	812	749	827	515	739,8
600	1064	1046	754	781	1062	941,4
700	1421	1426	1093	1390	1109	1287,8
800	1874	1609	1922	1597	1874	1775,2
900	2530	2582	2484	2639	2624	2571,8

График полученной зависимости приведен на рис. 2

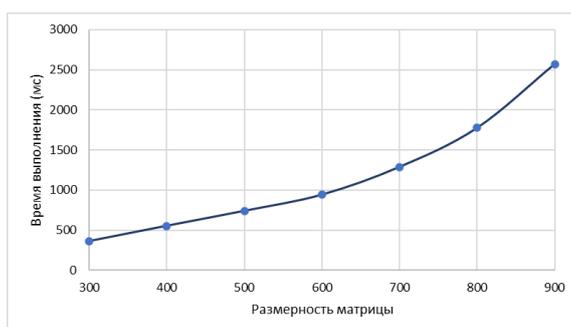


Рис. 2. Зависимость времени операции умножения от размерности матриц

В соответствии с методом гиперболической регрессии эта зависимость в аналитическом виде принимает вид

$$y = 0,00001x^3 - 0,01626x^2 + 8,8923x - 1175,7143. \quad (2)$$

Статистические характеристики для выражения (2) принимают значения: $KK = 0,9999$, $R^2 = 0,9998$, которые свидетельствуют о высокой степени согласованности формулы с экспериментальными данными.

Результаты времени передачи данных по сети в зависимости от размерности матриц приведены в табл. 4, а график – на рис. 3.

Таблица 4

Размерность	Время передачи данных на сети (мс)					
	1	2	3	4	5	Среднее
300	109	93	406	406	406	284
400	172	453	485	469	505	416,8
500	562	563	546	578	266	503
600	674	672	380	391	672	557,8
700	812	801	515	796	516	688
800	953	672	985	676	984	854
900	1141	1098	1141	1140	1156	1135,2

Необходимо подчеркнуть, что данные в табл. 4 имеют большой разброс, что тоже может сказываться на точности результатов экспериментов.

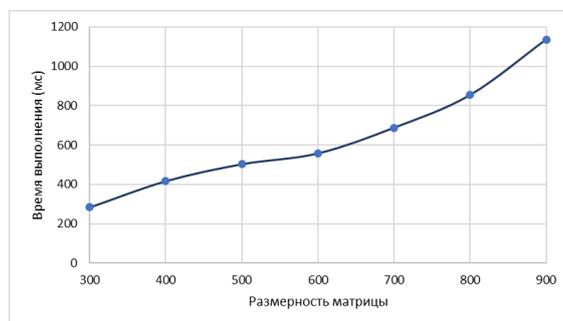


Рис. 3. Зависимость времени передачи данных по сети от размерности матрицы

Эта зависимость в аналитическом виде принимает вид

$$y = 0,00001x^3 - 0,00991x^2 + 5,86965x - 754,81905. \quad (3)$$

Статистические характеристики для выражения (3) принимают значения: $KK = 0,9997$, $R^2 = 0,9993$, которые также свидетельствуют о высокой степени согласованности формулы с экспериментальными данными.

Зависимость времени умножения матриц от их размерности без учета времени их передачи по сети приведена в табл. 5, а графическое представление этой зависимости приведено на рис. 4

Таблица 5

Размерность	Время умножения (мс)					
	1	2	3	4	5	Среднее
300	78	78	78	78	78	78
400	140	140	124	140	124	133,6
500	234	249	203	234	249	233,8
600	390	374	374	390	374	380,4
700	609	609	562	578	593	590,2
800	921	937	937	921	890	921,2
900	1374	1484	1327	1499	1468	1430,4

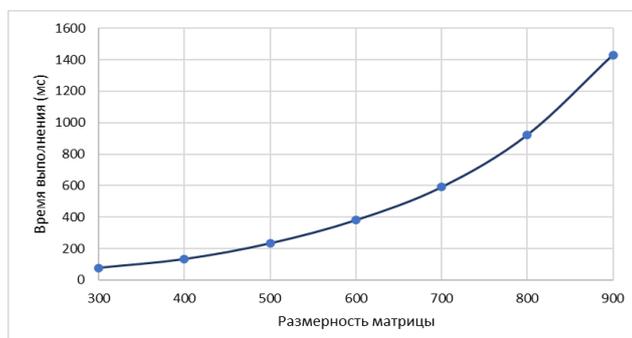


Рис. 4. Зависимость времени умножения матриц от их размерности без учета времени их передачи

Эта зависимость в аналитическом виде принимает вид

$$y = 0,00001x^3 - 0,00620x^2 + 2,91649x - 400,58095. \quad (4)$$

Статистические характеристики для выражения (4) принимают значения: $KK = 0,9999$, $R^2 = 0,9997$, которые также свидетельствуют о высокой степени согласованности формулы с экспериментальными данными.

Результаты эксперимента № 2. В табл. 6 приведены результаты общего времени выполнения операции умножения от числа задействованных серверов, а на рис. 5 – график полученной зависимости.

Таблица 6

Число серверов	Общее время выполнения (мс)					
	1	2	3	4	5	Среднее
1	49566	49958	49145	48976	49830	49495
2	27084	27690	29194	29717	29327	28602,4
3	22925	22514	23278	22848	22349	22782,8
4	21706	19434	19703	20267	19842	20190,4
5	18636	18260	18665	17782	18369	18342,4

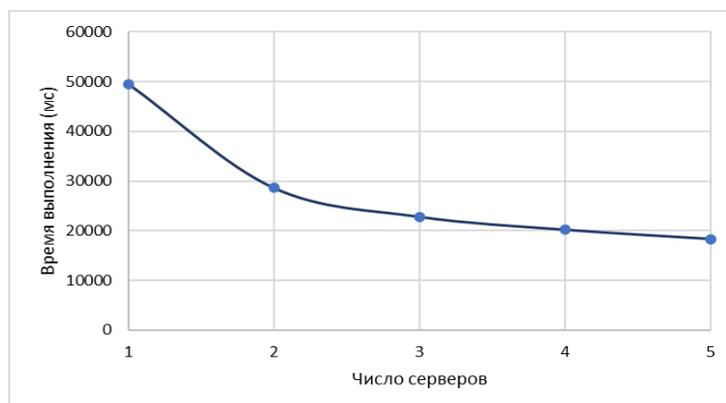


Рис. 5. Зависимость общего времени умножения от числа серверов

Эту зависимость в аналитическом виде можно представлять двумя равносильными выражениями:

$$y = 10043,3725 + \frac{39063,5639}{x}, \quad (5)$$

$$-1194,0833x^3 + 13697,8929x^2 - 52959,0238x + 89816,4000. \quad (6)$$

Статистические характеристики для выражения (5) принимают значения: $KK = 0,9988$, $R^2 = 0,9976$, а для выражения (6) соответственно: $KK = 0,9990$, $R^2 = 0,9981$. Эти значения свидетельствуют о статистической равнозначности формул (5) и (6) и их высокой степени согласованности с экспериментальными данными.

Поскольку таблица 6 и соответствующий рис. 5 отражают общее время выполнения процесса умножения матриц, то также представляет интерес получения временных результатов распределенного умножения матриц без учета времени передач данных по сети. Результаты передачи данных по сети представлены в табл. 7 и на рис. 6.

Таблица 7

Число серверов	Время передачи данных по сети (мс)					
	1	2	3	4	5	Среднее
1	4140	4454	4390	4425	4669	4415,6
2	3950	5618	5528	5145	5099	5068
3	5929	5658	6267	6274	5962	6018
4	7335	7391	7972	7520	7985	7640,6
5	8857	8544	8527	7995	8942	8573

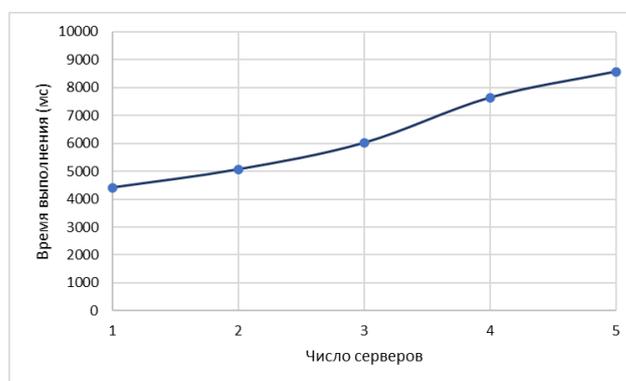


Рис. 6. Зависимость времени передачи данных по сети от числа задействованных серверов

Эта зависимость в аналитическом виде принимает вид

$$-82,4167x^3 + 829,8214x^2 - 1384,7619x - 5078,2000. \quad (7)$$

Статистические характеристики для выражения (7) принимают значения: $KK = 0,9982$, $R^2 = 0,9964$, которые свидетельствуют о высокой степени согласованности формулы с экспериментальными данными.

Зависимость времени умножения матриц от числа задействованных серверов без учета времени передачи данных по сети приведена в табл. 8, а графическое представление этих результатов приведено на рис. 7.

Эта зависимость в аналитическом виде принимает вид

$$y = 1138,4587 + \frac{44144,1051}{x}. \quad (8)$$

Статистические характеристики для выражения (8) принимают значения: $KK = 0,9992$, $R^2 = 0,9984$, которые также свидетельствуют о высокой степени согласованности формулы с экспериментальными данными.

Таблица 8

Число серверов	Общее время выполнения (мс)					
	1	2	3	4	5	Среднее
1	45426	45504	44739	44551	45145	45073
2	22619	22072	23650	24556	24213	23422
3	16996	16199	17011	16574	16371	16630,2
4	12950	12028	11528	12731	11700	12187,4
5	9310	8919	8951	9271	9427	9175,6

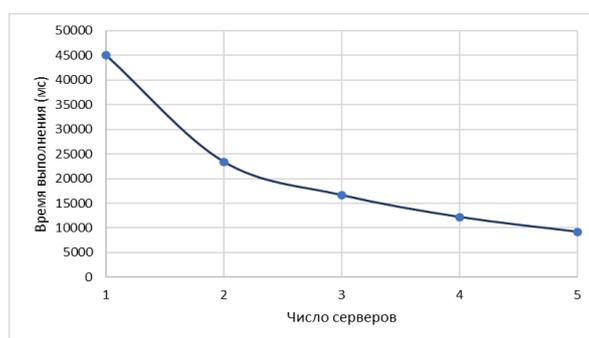


Рис. 7. Зависимость времени умножения матриц от числа серверов

Выводы и заключение. Приведенные материалы исследований процесса распределенного умножения матриц больших размерностей различными вычислительными средствами и их аналитическая обработка привели к неожиданному, в некоторой степени, результату. Он заключается в том, что используемый в исследованиях ноутбук с многоядерными процессорами оказался более быстродействующим вычислителем, чем однопроцессорный компьютер, подключенный к локальной сети. Одним из объяснений данного результата (феномена) можно считать близость нескольких процессорных ядер на одном кристалле в многоядерном процессоре. Поэтому электрические сигналы пробегают значительно меньшие расстояния, чем в локальной сети. Это позволяет благодаря использованию различных уровней кэш-памяти работать многоядерному процессору с гораздо более высокой тактовой частотой.

Проведенные исследования позволяют также сделать вывод, что использование однопроцессорного вычислителя в локальной сети для умножения матриц больших размерностей является не рациональным, поскольку время на перемещение данных по локальной сети перевешивает возможные выгоды от распараллеливания. Однако для окончательной убедительности необходимо проведение дополнительных исследований с различными моделями ноутбуков.

Кроме того, проведенные исследования наталкивают на мысль, что сравнительное распределенное умножение матриц больших размерностей можно использовать для оценки эффективности распределенных вычислений различными средствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каляев И.А. и др.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. – 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. И.А. Каляева. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – 344 с.
2. *Воеводин И.Б., Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 608 с.
3. *Ивашко Е.Е.* Современные технологии высокопроизводительных вычислений. – Петрозаводск, 2016. – 61 с.

4. <https://habr.com/ru/companies/intel/articles/243385/>.
5. *Кадомский А.А., Захаров В.А.* Эффективность многопоточных приложений // Научный журнал. – 2016. – № 7 (8). – С. 26-28.
6. Закон Амдала. – URL:<https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/433588>.
7. Закон Амдала и будущее многоядерных процессоров. – URL:<https://www.osp.ru/os/2009/04/9288815>.
8. *Глушань В.М., Лаврик П.В.* Ограничение быстродействия вычислительных систем в результате совмещения закона Амдала и гипотезы Минского // Тр. Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS-IT'13». Научное издание в 4-х т. Т. 1. – М.: Физматлит, 2013. – С. 129-137.
9. *Павлов А.В.* Архитектура вычислительных систем. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 86 с.
10. <https://www.kakprosto.ru/kak-901137-mnogoyadernye-processory-principy-rabot>.
11. *Радченко Г.И.* Распределенные вычислительные системы. – Челябинск: Фотохудожник, 2012. – 184 с.
12. *Глушань В.М., Красюк О.И., Лозовой А.Ю.* Параллельное умножение матриц больших размерностей на заданном множестве процессоров // Вестник РГРТУ. – 2020. – № 74. – С. 42-55.
13. *Глушань В.М.* Расширение функционала клиент-серверной подсистемы распределенного проектирования СБИС // Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 33-38.
14. *Glushan V.M., Lozovoy A.Yu.* On Distributed Multiplication of Large-Scale Matrices // 2021 IEEE 15th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – 2021. – P. 1-4.
15. *Глушань В.М.* Иерархические клиент-серверные архитектуры в распределенном проектировании и параллельных вычислениях // Современные компьютерные технологии: Матер. II научно-методической конференции НПП. – Таганрог, 2021. – С. 14-18.
16. *Глушань В.М., Попов Л.А.* Распределенное умножение матриц на компьютерах с многоядерными процессорами // Тр. Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2024» («IS&IT»). Научное издание в 2-х т. Т. 2. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2024. – С. 65-70.
17. *Глушань В.М., Попов Л.А.* Программа умножения матриц на компьютере с многоядерными процессорами. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663001, зарегистрировано 03.06.2024.
18. *Соснин В.В., Балакишин П.В.* Введение в параллельные вычисления. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 51 с.
19. AMD Ryzen™ 5 4600H Drivers & Support. – <https://www.amd.com/en/support/apu/amd-ryzen-processors/amd-ryzen-5-mobile-processors/radeon-graphics/amd-ryzen-5-4600h>.
20. Онлайн калькулятор: Аппроксимация функции одной переменной // PlanetCalc. – Режим доступа: URL: <https://planetcalc.ru/5992/> (дата обращения: 29.04.2024).

REFERENCES

1. *Kalyaev I.A. i dr.* Rekonfiguriruyemye mul'tikonveyernye vychislitel'nye struktury [Reconfigurable multiconveyor computing structures]. 2nd edition, reprint. and additional, Under the general editorship of I.A. Kalyaev. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTS RAN, 2009, 344 p.
2. *Voevodin I.B., Voevodin V.V.* Parallel'nye vychisleniya [Parallel computing]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2004, 608 p.
3. *Ivashko E.E.* Sovremennyye tekhnologii vysokoproizvoditel'nykh vychisleniy [Modern technologies of high-performance computing]. Petrozavodsk, 2016, 61 p.
4. Available at: <https://habr.com/ru/companies/intel/articles/243385/>.
5. *Kadomskiy A.A., Zakharov V.A.* Effektivnost' mnogopotochnykh prilozheniy [Efficiency of multi-threaded applications], *Nauchnyy zhurnal* [Scientific journal], 2016, No. 7 (8), pp. 26-28.
6. *Zakon Amdala* [Amdahl's Law]. Available at: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/433588>.
7. *Zakon Amdala i budushchee mnogoyadernykh protsessorov* [Amdahl's law and the future of multicore processors]. Available at: <https://www.osp.ru/os/2009/04/9288815>.
8. *Glushan' V.M., Lavrik P.V.* Ogranichenie bystrodeystviya vychislitel'nykh sistem v rezul'tate sovmeshcheniya zakona Amdala i gipotezy Minskogo [Limitation of the speed of computing systems as a result of combining Amdahl's law and the Minsk hypothesis], *Tr. Kongressa po intellektual'nyim sistemam i informatsionnym tekhnologiyam «IS-IT'13»* [Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies "IS-IT'13"]. Scientific publication in 4 vol. Vol. 1. Moscow: Fizmatlit, 2013, pp. 129-137.
9. *Pavlov A.V.* Arkhitektura vychislitel'nykh sistem [Architecture of computing systems]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2016, 86 p.
10. Available at: <https://www.kakprosto.ru/kak-901137-mnogoyadernye-processory-principy-rabot>.

11. Radchenko G.I. Raspredeleynnye vychislitel'nye sistemy [Distributed computing systems]. Chelyabinsk: Fotokhudozhnik, 2012, 184 p.
12. Glushan' V.M., Krasnyuk O.I., Lozovoy A.Yu. Parallel'noe umnozhenie matrits bol'shikh razmernostey na zadannom mnozhestve protsessorov [Parallel multiplication of large-dimensional matrices on a given set of processors], *Vestnik RGRU* [Bulletin of the Russian State Technical University], 2020, No. 74, pp. 42-55.
13. Glushan' V.M. Rasshirenie funktsionala klient-servernoy podsistemy raspredeleynnogo proektirovaniya SBIS [Expanding the functionality of the client-server subsystem of distributed VLSI design], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and Communication], 2021, No. 3, pp. 33-38.
14. Glushan V.M., Lozovoy A.Yu. On Distributed Multiplication of Large-Scale Matrices, *2021 IEEE 15th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, 2021, pp. 1-4.
15. Glushan' V.M. Ierarkhicheskie klient-servernye arkhitektury v raspredeleennom proektirovanii i parallel'nykh vychisleniyakh [Hierarchical client-server architectures in distributed design and parallel computing], *Sovremennye komp'yuternye tekhnologii: Mater. II nauchno-metodicheskoy konferentsii NPR* [Modern computer technologies: materials of the II scientific and methodological conference of the NPR]. Taganrog, 2021, pp. 14-18.
16. Glushan' V.M., Popov L.A. Raspredeleynnoe umnozhenie matrits na komp'yuterakh s mnogoyadernymi protsessorami [Distributed matrix multiplication on computers with multicore processors], *Tr. Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa «Intellektual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii – 2024» («IS&IT'»)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "Intelligent Systems and Information Technologies - 2024" ("IS&IT")]. Scientific publication in 2 vol. Vol. 2. Taganrog: Izd-vo Stupina S.A., 2024, pp. 65-70.
17. Glushan' V.M., Popov L.A. Programma umnozheniya matrits na komp'yutere s mnogoyadernymi protsessorami. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2024663001, zaregistrirvano 03.06.2024 [Matrix multiplication program on a computer with multicore processors. Certificate of state registration of the computer program No. 2024663001, registered on 06/03/2024].
18. Sosnin V.V., Balakshin P.V. Vvedenie v parallel'nye vychisleniya [Introduction to parallel computing]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2015, 51 p.
19. AMD Ryzen™ 5 4600H Drivers & Support. Available at: <https://www.amd.com/en/support/apu/amd-ryzen-processors/amd-ryzen-5-mobile-processors-radeon-graphics/amd-ryzen-5-4600h>.
20. Onlayn kal'kulyator: Approssimatsiya funktsii odnoy peremennoy [Online calculator: Approximation of a function of one variable], *PlanetCalc*. Available at: <https://planetcalc.ru/5992/> (accessed 29 April 2024).

Глушань Валентин Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: vmglushan@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматизированного проектирования имени проф. В.М. Курейчика; профессор.

Попов Леонид Андреевич – e-mail: lpopov@sfedu.ru; Институт компьютерных технологий и информационной безопасности; студент.

Целых Алексей Александрович – e-mail: tselykh@sfedu.ru; кафедра информационно-аналитических систем безопасности имени проф. Л.С. Берштейна; доцент.

Glushan Valentin Mihailovich – Southern Federal University; e-mail: vmglushan@sfedu.ru; the Department of Computer- Aided Design; professor.

Popov Leonid Andreevich – Southern Federal University, e-mail: lpopov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer-Aided Design; student.

Tselykh Alexey Alexandrovich – e-mail: tselykh@sfedu.ru, the Department of Information and Analytical Security Systems; associate professor.

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

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

В статье рассматриваются алгоритмы формирования траекторий движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при проведении поисково-спасательных и ликвидационных операций. Описаны методы и алгоритмы управления движением группы БПЛА в строю, при развертывании в линию, при развертывании в шеренгу, при поворотах, в колонне. Управление осуществляется с помощью альтернативных алгоритмов коллективной адаптации, основанных на идеях коллективного поведения. Рассмотрены принципы функционирования одного автомата адаптации. Целью управления ведомыми роботами является минимизация отклонений. Для реализации механизма адаптации параметрам вектора сопоставляются автоматы адаптации, моделирующие поведение объектов адаптации в среде. Разработана структура процесса альтернативной коллективной адаптации параметров, под контролем которых осуществляется движение группы БПЛА в строю. Разработаны оригинальные правила управления параметрами, обладающие рядом преимуществ по сравнению с другими методами: полная децентрализация управления в сочетании с динамической коррекцией параметров роботов, задающих положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейную скорость робота соответственно. Предложена структура маневра, выполняемого роботом для коррекции отклонений параметров. Управление осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации, что позволяет эффективно обрабатывать внештатные ситуации, такие как выход агентов из строя, изменения числа агентов вследствие выхода из строя или внезапного приобретения связи с очередным агентом, а также в условиях наличия ошибок измерений и шумов, удовлетворяющих определенным ограничениям.

Группа беспилотных летательных аппаратов; движение строя; групповое управление; децентрализованное управление; траектория; альтернативная коллективная адаптация; объект адаптации; роевые алгоритмы.

B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, M.I. Beskhmelnov

DECENTRALIZED CONTROL OF A GROUP OF AUTONOMOUS MOBILE OBJECTS WHEN FORMING A TRAJECTORY OF MOVEMENT

The article considers algorithms for generating unmanned aerial vehicles motion trajectories during search and rescue and liquidation operations. The methods and algorithms for controlling the motion of a unmanned aerial vehicles group in formation, when deployed in a line, when deployed in a rank, when turning, in a column are described. Control is carried out using alternative collective adaptation algorithms based on the ideas of collective behavior. The operating principles of one adaptation machine are considered. The purpose of controlling slave robots is to minimize deviations. To implement the adaptation mechanism, the parameters of the vector are matched with adaptation machines that model the behavior of adaptation objects in the environment. A structure has been developed for the process of alternative collective adaptation of parameters that control the motion of a group of unmanned aerial vehicles in formation. Original rules for controlling parameters have been developed that have a number of advantages over other methods: complete decentralization of control in combination with dynamic correction of robot parameters that set the position and orientation of the robot in an absolute coordinate system, and the linear velocity of the robot, respectively. A structure of a maneuver performed by a robot to correct parameter deviations is proposed. Control is performed using an alternative collective adaptation algorithm based on the ideas of collective behavior of adaptation objects, which allows for efficient processing of emergency situations, such as agent failure, changes in the number of agents due to failure or sudden acquisition of communication with the next agent, as well as in conditions of measurement errors and noise that satisfy certain restrictions.

Group of unmanned aerial vehicles; formation movement; group control; decentralized control; trajectory; alternative collective adaptation; adaptation object; swarm algorithms.

Введение. Для понимания актуальности вопросов управления движением группы БПЛА следует отметить, что современные технологии и автоматизированные системы сделали революционный скачок в различных сферах, таких как сельское хозяйство, логистика и оборона. Математические методы, основанные на машинном обучении, получили

существенный толчок благодаря возможности проводить сложные вычисления в реальном времени с помощью современных средств анализа данных. Такая синергия технологий привела к полной трансформации отраслей, повышая их эффективность и способствуя автономному решению различных задач [1].

Управление группой БПЛА представляет собой комплексную задачу, задействующую различные методы и алгоритмы для обеспечения координированного движения и выполнения общих задач. Отдельно взятые БПЛА уже обладают достаточной степенью автономности, но эффективное управление группой требует гораздо большего – от синхронизации данных в реальном времени до реализации сложных маневров и стратегий распределения задач между аппаратами. В основе подходов к управлению лежат алгоритмы машинного обучения, теории управления и алгоритмические стратегии, позволяющие аппаратам самостоятельно адаптироваться к изменению исполняемых задач и среды. Централизованное и децентрализованное управление представляют собой два основных подхода, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Важно не только обеспечивать взаимодействие между БПЛА, но и поддерживать их способность к самостоятельному принятию решений в случаях, когда связь с центральным управлением ограничена [1, 2].

Активное применение беспилотных аппаратов с искусственным интеллектом в оборонной сфере уже стало стандартом. Разведывательные операции и выполнение военных задач – главные функции таких устройств. В свою очередь, развитие дронов и автоматизация интерфейсов машин становится более ускоренным благодаря прогрессу интеграции машинного обучения [1, 2].

В разных областях применения от обороны до космических аппаратов машинное обучение становится ключевым элементом, который содействует совершенствованию связи между дронами. Эти беспилотники совершенствуют свои маршруты полета, экономят энергию и обеспечивают своевременные поставки, благодаря использованию искусственного интеллекта. Растущие возможности технологии дронов приводятся в движение развивающимся машинным обучением, которое делает их автономными и способными выполнять сложные задачи без непосредственного участия человека. Машинное обучение революционизировало механизмы и в целом приборостроение, повысив технологичность и снизив ресурсозатраты [3–5].

Основные методы навигации и планирования маршрутов для управления движением группы БПЛА включают использование автономных алгоритмов, основанных на предварительном и в реальном времени расчете траекторий. Важной частью является интеграция картины местности и учет препятствий при маршрутизации, что достигается через применение ГИС-технологий и датчиков дистанционного зондирования. Алгоритмы виртуальных точек и потенциальных полей позволяют моделировать поведение группы БПЛА как единого роя, оптимизируя пути обхода препятствий и минимизируя риски коллизий. Широко применяются также методы искусственного интеллекта и машинного обучения для адаптации полетных задач в зависимости от меняющихся условий и целей миссии. Эти подходы повышают эффективность использования групп БПЛА в различных областях, от военных операций до мониторинга и сельскохозяйственных работ [1–4].

Для обеспечения безопасности и надежности дронов и наземных станций управления важно автоматизировать их взаимодействие через разработку сложных алгоритмов машинного обучения. Они способны эффективно координировать действия десятков или сотен дронов одновременно, предотвращая столкновения и обеспечивая бесперебойную работу системы. Проблемы, связанные с безопасностью, вопросами ее регулирования и созданием надежных систем, могут быть успешно решены путем применения таких инновационных решений [4].

В современном мире искусственный интеллект находит новые области для своего применения, развивая ключевую роль в важных сферах. Взаимодействие и сотрудничество дронов в процессе выполнения сложных задач, вдохновленное коллективным поведе-

нием социальных насекомых, например муравьев и пчел, представляет собой хороший пример применения машинного обучения. В этом контексте особенно значимы БПЛА, эффективно применяемые для мониторинга линий электропередач, дорог и государственных границ [6].

Благодаря их уникальным возможностям такие аппараты применяются для различных целей. Например, их используют для поиска лесного огня, оперативной ликвидации чрезвычайных ситуаций и наблюдения за теми, кто нарушает правила дорожного движения. Также эти устройства очень полезны в ситуациях бедствия природного характера, так как их способность охватывать огромные территории позволяет идентифицировать людей, которым нужна помощь, и организовывать доставку необходимых материалов в этих местах [5, 6].

Исследование в области управления роботами под командованием находится под влиянием теории группового управления, которая активно исследует методы роя и стаи для управления роботами в групповой среде. Новая область управления робототехникой получает особое внимание в рамках этой теории. Роевые алгоритмы, основанные на локальном взаимодействии однородных роботов, обеспечивают скоординированное направление к цели, умелый обход препятствий и другие операции. Стайные алгоритмы, в свою очередь, предполагают взаимодействие роботов на основе их общих знаний и индивидуальных правил поведения в стае [6, 7].

Данная работа посвящена совершенствованию механизмам управления автономных БПЛА на основе децентрализованного управления. В результате, было разработано правило для группы агентов, моделирующих мобильных роботов, обеспечивающее их движение с заданной геометрической структурой строя, выраженной удержанием взаимного расстояния, с учетом требований полной автономности и получения информации от ближайших соседей [2, 5–7].

Движение группы беспилотных летательных аппаратов. Управление движением группы БПЛА в строю представляет собой сложную и актуальную задачу в области авиационной техники. Современные технологии позволяют создавать эффективные системы управления, которые обеспечивают синхронное и безопасное перемещение нескольких БПЛА в одном формировании [2, 8].

Организация движения группы БПЛА требует точного расчета траекторий полета, учета параметров окружающей среды и мгновенного реагирования на изменяющиеся условия. В данной статье рассмотрим основные принципы управления такими группами, возможности использования автопилотов и систем связи для координации действий между БПЛА, а также перспективы развития данной области в будущем [2, 8, 9].

Основные принципы управления группой БПЛА в строю включают в себя координацию действий между отдельными аппаратами, обеспечение их безопасного перемещения и выполнение поставленных целей с минимальной вероятностью коллизий. Для эффективного управления группой БПЛА необходимо четко определить роль каждого участника, задать коммуникационные протоколы и установить строгие процедуры взаимодействия. Ключевыми элементами успешного управления такой группой являются поддержка передачи данных между БПЛА, адаптация к изменяющимся условиям полета и организация тактического взаимодействия для достижения общих целей [2, 10].

Для этого детально описаны алгоритмы, которые можно использовать для построения траекторий движения БПЛА при мониторинге в ходе поисково-спасательных и ликвидационных операций. Используемые алгоритмы можно реализовывать для перемещения роботов в зоны без препятствий и согласованного распределения команды роботов в рабочем пространстве [2]. На рис. 1 показаны основные траектории, которые можно использовать для перемещения группы БПЛА.

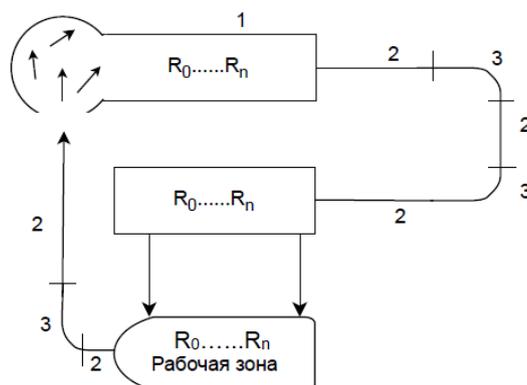


Рис. 1. Перемещение группы БПЛА при выполнении работ

На участке 1 формируется строй в линию. На участке 2 перемещение группы БПЛА, развернутых в линию. На участке 3 перемещение группы БПЛА на повороте.

Чтобы гарантировать точную координацию внутри группы, оптимальную совместимость и эффективное движение БПЛА в районе миссии, при их движении необходимо соблюдать геометрическую структуру формирования. В пространстве или на плоскости строй (формирование или соединение) является необходимой площадкой для установки БПЛА. Формулировка задачи формирования может различаться в зависимости от способа установления целевого образования, в зависимости от метода его определения. Для получения определенной геометрической формы группа автономных БПЛА управляет формированием путем получения заданной геометрической формы в управлении формированием группы. В процессе реализации задачи, от группы требуется поддержание формы, осуществляя действия как единое твердое тело [1, 2–10].

Применение алгоритмов машинного обучения и развитых техник искусственного интеллекта (ИИ) играет ключевую роль в управлении движением групп БПЛА. Эти методы позволяют автономно совершенствовать стратегии полётов, адаптируясь к изменяющимся условиям в реальном времени [11].

Координация полетов группы БПЛА предполагает грамотное управление движением каждого аппарата в строю. При этом важным техническим аспектом является обеспечение бесперебойной связи между всеми БПЛА с целью передачи данных о местоположении, скорости и других параметрах полета. Для эффективной координации полетов необходимо использовать специализированные системы управления, позволяющие оперативно анализировать информацию от каждого аппарата и принимать соответствующие решения для поддержания идеального строя. Технические средства координации полетов также включают в себя системы автоматического управления трассой полета и автоматической коррекции ошибок, что позволяет минимизировать риски столкновений и обеспечить безопасность полетов группы БПЛА [11, 12].

Алгоритмы машинного обучения могут обрабатывать большие объёмы данных с датчиков БПЛА, что улучшает способность к предсказанию и избеганию столкновений, оптимизирует маршруты и распределение задач между аппаратами в группе. Искусственный интеллект способствует в создании гибких и адаптивных управленческих систем, способных координировать сложные многоуровневые операции без постоянного вмешательства человека, что критически важно для выполнения задач в условиях, где скорость реакции и точность решений имеют первостепенное значение [13–15].

В простейшем случае целевой строй задается через координаты целевых положений БПЛА. Методы построения плоских и пространственных формаций в группах квадрокоптеров рассмотрены в ряде современных отечественных и зарубежных работ [1–5, 13–15]. Формирование траекторий движения предполагает постоянный учет координат в рабочем пространстве.

Представленные выше траектории (рис. 1) передвижения группы БПЛА предполагают следующее:

- ◆ Формирование строя, развернутого в линию, что позволяет перегруппировать несколько БПЛА и перейти в порядке движения к строю, определяемому как «конвой».
- ◆ Перемещение группы БПЛА, развернутых в линию, что позволяет обеспечить движение ведущего БПЛА автономно, а остальные, при этом, осуществляют слежение за ним, рис. 2. Группе допускается совершить остановку и перезапуск процесса конвоирования в следствие динамики внешней среды, а также группа может продолжать движение при неисправности одного или нескольких роботов, исключая ведущего.
- ◆ Перемещение коллектива мобильных БПЛА, выстроенных в шеренгу, относительно базовой линии в процессе мониторинга, рис. 3.

Некоторые подходы, используемых в решении задач управления строем, применяют понятия виртуальных формаций и/или виртуальных лидеров [2].

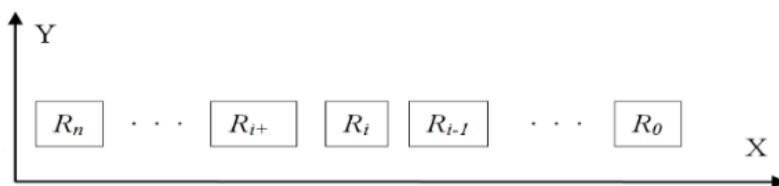


Рис. 2. Схема движения группы БПЛА, развернутых в линию

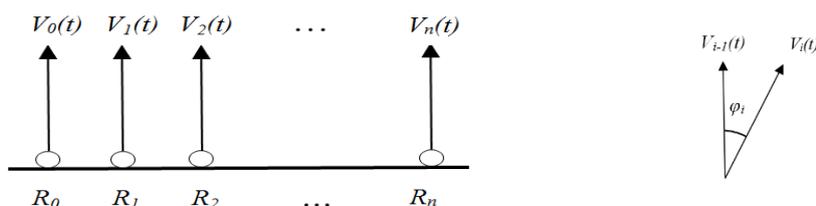


Рис. 3. Схема движения группы БПЛА, развернутых в шеренгу

Этот подход основан на том, что каждый робот в формировании следует за назначенной точкой – виртуальным лидером, который меняет координаты в соответствии с predetermined правилом. Эти координаты определяются внешними вычислениями и служат входными параметрами для агента. В этой структуре каждому агенту назначается виртуальное формирование, которое диктует геометрию всего формирования. Агенту дается определенная пронумерованная точка внутри этого виртуального формирования, а также траектория движения, которая определяет структуру формирования. Для этого рассматриваются системы, в которых агенты перемещаются в евклидовом пространстве с квантованными временными интервалами [2, 13–15].

Операторы играют ключевую роль в управлении групповыми полетами (БПЛА). Их задачи включают в себя определение маршрутов полета, контроль за выполнением задач каждым БПЛА в группе, а также обеспечение согласованности и синхронизации действий между ними. Операторы должны обладать высокой квалификацией и уметь принимать решения быстро и эффективно. Кроме того, они отвечают за обеспечение безопасности полетов, оперативное реагирование на любые непредвиденные ситуации и обмен информацией с другими участниками процесса. Важно, чтобы операторы были хорошо координированы и обладали хорошими коммуникационными навыками для успешного управления движением группы БПЛА в строю [16].

Основной целью является разработка системы управления группы БПЛА в строю, когда ведущий БПЛА движется автономно, а ведомые БПЛА повторяют траекторию своего ведущего БПЛА с некоторым временным запаздыванием t , а также способы, связанные с изменением топологии группы. На рис. 4 и 5 показано перемещение формации группы БПЛА, развернутых в линию, по прямому пути и при повороте.

с обратной связью, минимизирующих эти отклонения. Для управления движением БПЛА по траектории предшествующего БПЛА использовались кинематические уравнения в переменных состояния, описывающие цели управления, при этом задача локализации робота решалась с использованием их относительного положения.

Рассмотрим схему движения при условии мониторинга группы БПЛА, развернутых в шеренгу (рис. 3). Известен вектор состояния каждого из БПЛА в абсолютной системе координат, $W_i=(x_i, y_i, \alpha_i, h_i, V_i)$,

где (x_i, y_i) – координаты места расположения БПЛА,

V_i – скорость передвижения робота,

α_i – угол между вектором V_i и базовой линией,

h_i – модуль вектора V_i .

Заданы α_0 – для ведущего БПЛА и D – расстояние в линии между соседними БПЛА R_i и R_{i-1} .

Перейдем к задаче управления ведомыми БПЛА, цель можно формализовать как достижение следующих равенств:

1. $V_{i-1}(t) = V_i(t)$.
2. $h_{i-1}(t) = h_i(t)$.
3. $x_{i-1}(t) - x_i(t) = D$.
4. $y_i(t) = y_{i-1}(t)$.
5. $\alpha_i(t) = \alpha_{i-1}(t) = \alpha_0$.
6. $\varphi_i(t) = \alpha_i(t) - \alpha_{i-1}(t)$ – угол между $V_{i-1}(t)$ и $V_i(t)$.

(1)

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производится перепланирование параметров движения каждого БПЛА R_i , движущегося параллельно с соседним БПЛА R_{i-1} . Ошибкой БПЛА R_i является: $\delta_i = k_1$.

Ошибка перемещения роботов: $\Delta = \sum_i \delta_i$.

Максимальные значения отклонения скорости: $\delta V = V_i(t+1) - V_i(t)$ и угла «рыскания» $\varphi_{i,i-1}(t+1) - \varphi_i(t) = \alpha_i(t) - \alpha_{i-1}(t)$ устанавливаются системой управления в допустимых пределах.

Разработаны правила устранения расхождения курса робота R_i с курсом робота R_{i-1} .

Если существуют отклонения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_h &= h_i(t) - h_{i-1}(t), \varepsilon_y = y_i(t) - y_{i-1}(t), \varepsilon_x = x_i(t) - x_{i-1}(t), \varepsilon_h = \\ &= h_i(t) - h_{i-1}(t), \varphi_i(t) > 0, \end{aligned} \quad (2)$$

то выполняется коррекция. Цель коррекции – минимизация разности $(|\varepsilon_x| - D)$.

Предложена структура маневров, выполняемого БПЛА для коррекции отклонений параметров, заключающаяся в следующем. Сначала БПЛА R_i изменяет значение параметра $\alpha_i(t)$ на величину δ_i , затем в течение времени δ_i БПЛА передвигается с новым значением параметра $\alpha_i^*(t) = \alpha_i(t) + \delta_i$. По истечении времени δ_i возвращается исходное значение параметра, с которым БПЛА продолжает движение.

Рассмотрим схему движения группы БПЛА, развернутых в линию. Известен вектор $V_i=(x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ состояния каждого из БПЛА в абсолютной системе координат. В скобках $(x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ положение и ориентация БПЛА в абсолютной системе координат, и линейная скорость БПЛА соответственно. S_0 – фиксированная дистанция (расстояние) между любой парой соседних в линии роботов R_i и R_{i+1} в абсолютной системе координат. Пусть

$S_i(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_{i-1}(t))^2 + (y_i(t) - y_{i-1}(t))^2}$ – расстояние между двумя соседними роботами R_i и R_{i+1} .

$\omega_{i,i-1} = \varphi_i - \varphi_{i-1}$ – угол между осями $O_i X_i$ и $O_{i-1} X_{i-1}$ связанных систем координат соседних роботов R_i и R_{i+1} .

$V_i(t)$ – линейная скорость передвижения робота R_i момент времени t .

Рассмотрим теперь соответствующие модели. Кинематическая модель каждого из БПЛА имеет вид:

$$\omega_{i,i-1}(t+1) = \omega_{i,i-1}(t) + \delta_{\omega}\omega_{i,i-1}(t). \quad (3)$$

$$V_i(t+1)\cos\omega_{i,i-1}(t+1) = V_{i-1}(t+1) + \delta_V V_{i-1}(t+1). \quad (4)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \delta_x x_i(t). \quad (5)$$

$$y_i(t+1) = y_i(t) + \delta_y y_i(t). \quad (6)$$

Рассмотрим теперь задачу управления ведомыми роботами. Главная идея состоит в том, что целью управления ведомыми роботами является достижение равенств:

$$\omega_{i,i-1}(t+1) = 0. \quad (7)$$

$$V_i(t+1)\cos\omega_{i,i-1}(t) = V_{i-1}(t). \quad (8)$$

$$S_i = S_0. \quad (9)$$

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производится перепланирование параметров движения роботов, следующих за роботом R_{i+1} .

Ошибкой БПЛА R_i является:

$$\delta_{S_i} = S_i(t) - S_0, \omega_{i,i-1}(t) > 0, \delta_{x_i}, \delta_{y_i} - \text{отклонения от базовой точки.}$$

Задача состоит в том, чтоб R_i точно следовал за БПЛА R_{i+1} .

Максимальные значения скорости $V_i(t+1)$ и угла рыскания $\omega_{i,i-1}(t+1)$ устанавливаются системой управления в допустимых пределах.

Приведем применяемые продукционные правила в порядке приоритета их исполнения.

Правило 1 (коррекция отклонения курса робота R_{i+1}):

Если $\omega_{i,i-1}(t) > 0$, система выполняет адаптацию и корректировку угла между осями $O_i X_i$ и $O_{i-1} X_{i-1}$ с целью его снижения, в соответствии с выражением (2).

Правило 2: если отклонение и время отработки данного отклонения не больше определенных заранее порогов, то выполняется коррекция скорости $V_i(t+1)$ движения по текущему отклонению от траектории следования псевдоцели, в соответствии с выражением (2).

Первое правило предназначено для решения задач управления, которые оказывают существенное влияние на направление движения агента, тогда как второе правило фокусируется на ситуациях, когда управляющие воздействия существенно влияют на скорость агента. Для каждого правила управления предоставляется дискретный аналог.

Оптимизация тактики и стратегии управления группой БПЛА играет ключевую роль в повышении эффективности и безопасности их действий в строю. Для достижения оптимальных результатов необходимо учитывать различные факторы, такие как скорость и направление движения, условия окружающей среды и цели миссии. Современные системы управления БПЛА позволяют автоматизировать процессы координации и взаимодействия между отдельными аппаратами, что обеспечивает более точное выполнение задач и снижает вероятность столкновений. Применение новейших технологий и алгоритмов обеспечивает быструю адаптацию тактики управления к изменяющимся условиям, что повышает гибкость и эффективность работы группы БПЛА в строю [2, 20–22].

Формирование БПЛА анализируется как многоагентная система, включающая N автономных агентов, где $N \geq 2$. Изначально БПЛА могут располагаться на любом расстоянии от конечного пункта назначения, а архитектура их взаимодействия может быть представлена в виде связного графа, иллюстрирующего траектории ведущего и ведомого роботов [2, 11–20].

Алгоритмы управления движением группы беспилотных летательных аппаратов. В современном мире БПЛА находят широкое применение в различных сферах, начиная от военных операций и заканчивая сельским хозяйством. Особенно актуальным становится вопрос координации действий группы БПЛА, способных действовать согласованно и эффективно. Управление движением группы БПЛА в строю представляет со-

бой сложную задачу, которая включает в себя разработку алгоритмов взаимодействия, обеспечивающих высокую точность, надёжность и безопасность выполнения полётных заданий [10–16].

Разработка механизмов управления движением группы БПЛА требует комплексного подхода, включающего в себя не только аспекты управления и навигации, но и обработку информации, получаемой от датчиков в реальном времени. Это позволяет каждому аппарату в группе не только сохранять заданное положение относительно других БПЛА, но и адаптироваться к изменениям внешней среды, обеспечивая тем самым гибкость и автономность действий группы. Введение в эксплуатацию таких систем управления открывает новые перспективы для применения БПЛА в сложных и динамичных условиях [21, 22].

Управление движением группы БПЛА в строю осуществляется с помощью альтернативного алгоритма коллективной адаптации, вдохновленного принципами коллективного поведения в адаптивных системах [2, 7].

Для эффективного управления движением группы БПЛА в строю ключевым аспектом является координация маневров. Современные технологии предоставляют широкие возможности для синхронизации действий отдельных аппаратов. Принципы распределённого контроля позволяют каждому БПЛА действовать как самостоятельный узел в объединённой сети, в то же время поддерживая общие цели и задачи группы. Основываясь на данных *GPS* и инерционных измерительных систем, БПЛА могут определять своё положение и корректировать траекторию в соответствии с изменениями в их окружении и действиями соседних аппаратов. Алгоритмы машинного обучения позволяют предвидеть возможные столкновения и оптимизировать маршрут, обеспечивая высокую точность и безопасность полётов. Так, каждый БПЛА способен мгновенно реагировать на команды и изменять своё положение в строю, сохраняя оптимальные интервалы и скорости.

Для «догоняющего» робота R_i в строю БПЛА адаптивными параметрами являются компоненты вектора $V_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$, которые служат для управления положением робота, ориентацией в абсолютной системе координат и линейной скоростью. При движении группы БПЛА в строю для каждого БПЛА известен вектор состояния:

$$W_i = (x_i, y_i, \alpha_i, h_i, V_i), \quad (10)$$

где α_i – угол между вектором V_i и базовой линией,

h_i – величина вектора V_i .

Угол α_0 заранее определен для ведущего БПЛА, а D представляет собой расстояние между соседними БПЛА R_i и R_{i-1} в строю.

Для реализации механизма адаптации каждый вектор $V_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ связан с машинами адаптации (МА) – $a_{x_i}^o, a_{y_i}^{xy}, a_{\varphi_i}^V$, которые моделируют поведение адаптивных элементов в среде. Каждая МА имеет две группы состояний: $C_1 = \{c_{1i}/i=1, 2, \dots, g\}$, соответствующие альтернативе A_1 (настроить параметр), и $C_2 = \{c_{2i}/i=1, 2, \dots, g\}$, соответствующие альтернативе A_2 (сохранить параметр).

Выходной алфавит МА $A = \{A_1, A_2\}$. Количество состояний в каждой группе определяется параметром g , представляющим глубину памяти. Входной алфавит $Q = \{+, -\}$ включает возможную обратную связь от среды: «вознаграждение» или «наказание». Сигнал «вознаграждение» или «наказание» подается в МА на основе состояния адаптивного элемента (векторного параметра V_i) в среде. Знак «+» обозначает переходы в МА из-за сигнала «вознаграждение», а знак «-» переходы из-за сигнала «наказание».

В основе управления движением группы БПЛА в строю лежат алгоритмы, позволяющие эффективно формировать и поддерживать формацию в различных условиях. Эти алгоритмы обеспечивают координированные действия БПЛА при изменении скорости, направлении движения и при маневрировании. Распространенным методом является использование виртуальных структур, где каждый БПЛА занимает заранее оговоренное место относительно ведущего аппарата или фиксированной точки в пространстве. Для адаптации к динамически изменяющейся обстановке применяются алгоритмы на основе искусственных нейронных сетей и методов машинного обучения, позволяющие БПЛА

самостоятельно корректировать полет в соответствии с текущими условиями и поведением остальных участников группы. Это обеспечивает высокую степень автономности и эффективность выполнения задач [2, 11, 13].

Работа следует следующим принципам: первоочередно стартует в одном из своих начальных состояний. На каждом этапе действия разворачиваются в четыре цикла. В первом цикле для каждого R_i фиксируются текущие значения векторных параметров V_i . Во втором цикле, если текущий параметр p_i отклоняется от запрограммированного значения, адаптационная машина a_i получает сигнал «наказание» (-) от окружающей среды; в противном случае она получает сигнал «вознаграждение» (+). В третьем цикле каждый МА a_i переходит в новое состояние на основе полученной реакции окружающей среды q_i . В четвертом цикле для каждого адаптивного элемента выполняется альтернативное действие в соответствии с выходами АМ. Если МА $a_i(t+1)$ находится в одном из состояний группы C_{ij}^2 , параметр p_i остается неизменным. Если $a_i(t+1)$ находится в состоянии внутри группы C_{ij}^1 , то $|p_i(t+1)| = |p_i| - \delta_{\omega}|p_i|$. Процесс настройки параметров вектора $V_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ заключается в минимизации расхождения между текущими и запрограммированными значениями.

Исследование эффективности механизмов управления движением группы БПЛА в строю остается критически важным аспектом для обеспечения успешного выполнения сложных задач. Анализ различных управляющих алгоритмов, таких как роевые алгоритмы, стратегии, основанные на искусственном интеллекте и машинном обучении, позволяет оценить их способность к адаптации в динамичных условиях и эффективность в координации действий между единицами. Важную роль играет также изучение взаимодействия между БПЛА с точки зрения распределения задач и обмена информацией в реальном времени, что напрямую влияет на их способность к маневрированию и поддержанию оптимального строя при различных внешних воздействиях. Оптимизация этих механизмов способствует повышению не только надежности, но и безопасности полетов группы БПЛА [2, 11, 13–19].

Экспериментальные исследования. Повышение эффективности выполнения задач группой БПЛА в структурированном строю может быть достигнуто путем объединения и разработки методов, основанных на процедурах искусственного интеллекта. Основная цель экспериментального исследования – уточнение различных подходов и выявление оптимальной стратегии управления группой БПЛА с минимальной коммуникацией между ними. В данном исследовании были реализованы алгоритмы на основе эволюционной памяти и адаптивных автоматов, опирающиеся на принципы коллективного поведения адаптивных систем. Оператор определяет количество задач, параметров, их значения и возможность реализации автоматических режимов для минимизации необходимости ручных корректировок, стремясь к полной автоматизации группы БПЛА. Полетное задание состоит из набора абстрактных параметров высокого уровня:

- ◆ Тип строя.
- ◆ Тип задачи.
- ◆ Заданная область или точные координаты цели.
- ◆ Максимальная или точная высота.
- ◆ Базовые координаты (при необходимости).

Для моделирования движения группы БПЛА с сохранением определенного геометрического строя в ходе экспериментального исследования в основном использовались многороторные БПЛА, со следующими характеристиками:

- ◆ Количество двигателей – 4 двигателя.
- ◆ Максимальный габарит – не более 0,5 м.
- ◆ Масса – не более 2,5 кг.

Тип автопилота и базовое программное обеспечение – ArduPilot. (открытый исходный код на C++ по лицензии GNU General Public License v3.0).

Демонстрация проходила в робототехническом 3D симуляторе Gazebo – (открытый исходный код на C++ по лицензии Apache License 2.0).

При этом GNU GPL v3.0 и Apache License 2.0 – подходят под закрытое и коммерческое использование при сохранении открытости исходных частей кода и копировании лицензионного соглашения.

Для тестирования и отладки разработанного программного обеспечения для управления группой автономных БПЛА были заданы следующие условия полетного задания: Автоматический горизонтальный полет на постоянной высоте из заданной точки до цели с обходом препятствий и возвратом в исходную точку. Группа состоит из шести БПЛА. Расстояние между БПЛА в группе составляет от 1 метра до 50 метров. Цель располагается на расстоянии до 1 километра от исходной точки. Скорость полета может достигать 100 км/ч. Типы препятствий включают прямоугольные формы (имитирующие здания) или более округлые формы (имитирующие лес), рисунок 6. Группа БПЛА в полете образует различные геометрические фигуры, например колонну или треугольник, рис. 7.

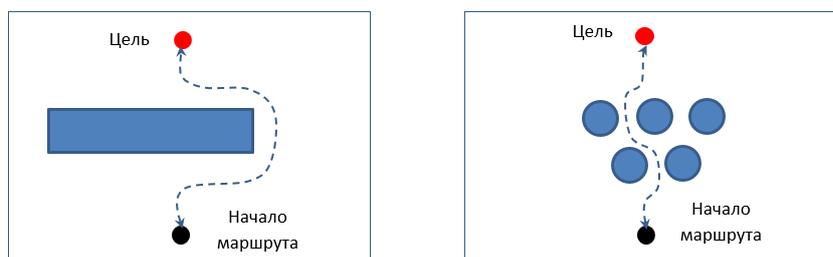


Рис. 6. Прямоугольное препятствие и группа круглых препятствий



Рис. 7. Построение группы БПЛА в колонну и треугольник

Основными показателями при выполнении движения группой БПЛА являются: Длина траектории (P_L), Показатель безопасности (S_m), Время выполнения задания (t_m), Коэффициент успешности миссии (M).

Сравнение значений этих показателей, полученных с использованием разработанного метода для системы управления группой БПЛА в строе на тестовых примерах, показало, что применение данного метода позволило повысить эффективность выполнения полетного задания на 20-24%. Общая оценка временной сложности разработанного подхода лежит в пределах $O(n^2) - O(n^3)$.

Заключение. Исследование сосредоточено на разработке алгоритмов для планирования траектории БПЛА во время поисково-спасательных операций и операций по ликвидации последствий стихийных бедствий. Были введены новые математические методы для моделирования движения дронов. Исследование детально рассматривает методы и алгоритмы управления движением группы БПЛА в различных формациях, включая колонные и линейные формации, а также во время маневров, например, таких как повороты. Стратегия управления включает в себя постоянное перепланирование параметров движения каждого робота в группе в каждый момент времени t , гарантируя, что каждый робот движется параллельно своим соседним коллегам. Основная цель управления роботами-ведомыми – минимизировать отклонения от желаемой траектории. На основе данного исследования разработаны новые правила управления этими параметрами, которые предлагают несколько преимуществ по сравнению с существующими методами. Эти

преимущества включают в себя полную децентрализацию управления в сочетании с динамической коррекцией параметров роботов. Это позволяет точно регулировать положение и ориентацию роботов в абсолютной системе координат, а также линейную скорость каждого робота.

Была предложена конкретная структура маневрирования, которую роботы могут выполнять для исправления любых отклонений в своих параметрах. Эта структура маневрирования имеет решающее значение для поддержания желаемого строя и траектории, особенно в динамических средах. Управление реализовано с использованием алгоритма, основанного на альтернативных принципах коллективной адаптации, вдохновленных коллективным поведением адаптивных систем. Такой подход позволяет системе эффективно справляться с непредвиденными ситуациями, такими как отказ отдельных агентов, изменение количества агентов из-за поломки или внезапного добавления нового агента, а также наличие ошибок измерения и шума в определенных пределах. Адаптивная природа алгоритма позволяет группе БПЛА сохранять сплоченность и продолжать свою миссию даже в сложных и непредсказуемых условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бурдаков С.Ф., Сизов П.А.* Алгоритмы управления движением мобильного робота в задаче преследования // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2014. – № 6 (210). – С. 49-58.
2. *Котов Д.В., Лебедев О.Б.* Методы и алгоритмы управления движением группы беспилотных летательных аппаратов // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. научных трудов XII-й Международной научно-технической конференции. – Колומна: Универсум, 2024. – С. 236-248.
3. *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.
4. *Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Адаптивное управление передвижением коллектива мобильных роботов развернутых в линию // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. научных трудов X-й Международной научно-технической конференции. – Смоленск: Универсум, 2021. – С. 238-246.
5. *Гузик В.Ф., Переверзев В.А., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В.* Принципы построения экстраполирующего многомерного нейросетевого планировщика интеллектуальной системы позиционно-траекторного управления подвижными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 67-80.
6. *Костюков В.А., Медведев И.М., Медведев М.Ю., Пишихов В.Х.* Численное моделирование роевого алгоритма планирования пути в двухмерной некартографированной среде // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 26-40.
7. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – 3-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 448 с.
8. *Кузнецов А.В.* Модель движения и взаимодействия системы интеллектуальных агентов // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2018. – № 2. – С. 130-138.
9. *Муслимов Т.З., Мунасыпов Р.А.* Децентрализованное групповое нелинейное управление строем беспилотных летательных аппаратов самолетного типа // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, № 1. – С. 43-50.
10. *Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф., Медведев М.Ю., Пишихов В.Х., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В., Соловьев В.В., Финаев В.И.* Интеллектуальные технологии планирования перемещений подвижных объектов в трехмерных недетерминированных средах. – М.: Наука, 2017. – 232 с.
11. *Нейдорф Р.А., Полях В.В., Черногоров И.В., Ярахмедов О.Т.* Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3 (176). – С. 127-143.
12. *Пишихов В.Х. и др.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пишихова. – М.: Физматлит, 2014.
13. *Гайдук А.Р., Мартынов О.В., Медведев М.Ю., Пишихов В.Х., Хамдан Н., Фархун А.* Нейросетевая система управления группой роботов в неопределенной двумерной среде // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 21 (8). – С. 470-479.
14. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011.

15. Иванов Д.Я. Распределение ролей в коалициях роботов при ограниченных коммуникациях на основе роевого взаимодействия // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2019. – № 78. – С. 23-45.
16. Пишихонов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В. Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления. – 2015. – № 4. – С. 66-74.
17. Caro G.D., Ducatelle F. AntHocNet: An adaptive nature inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks // European Transactions on Telecommunications. – 2005. – No. 16 (5). – P. 443-455.
18. Chen S., Eshaghian M.M. A fast recursive mapping algorithm. Department of computer and information science. – New Jersey, USA: New Jersey, 2013. – P. 219-227.
19. Fatemeh K.P., Reza S.N. Comparing the Performance of Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization Algorithm for Mobile Robot Path Planning in the Dynamic Environments with Different Complexities // Journal of Academic and Applied Studies. – 2013. – Vol. 3 (2). – P. 29-44.
20. Hoefler T., Snir M. Generic Topology Mapping Strategies for Large-scale Parallel Architectures. – University of Illinois, 2011. – P. 75-85.
21. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Management of Behavior of a Swarm of Robots Applicable to the Tasks of Monitoring a Some Territory // Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. – Springer, Czech Republic, 2020. – Vol. 2. – P. 324-332.
22. Макаренко С.И. Робототехнические комплексы военного назначения современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 2.

REFERENCES

1. Burdakov S.F., Sizov P.A. Algoritmy upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota v zadache presledovaniya [Algorithms for controlling the motion of a mobile robot in a pursuit problem], *Informatika, telekommunikatsii i upravlenie* [Computer Science, Telecommunications and Management], 2014, No. 6 (210), pp. 49-58.
2. Kotov D.V., Lebedev O.B. Metody i algoritmy upravleniya dvizheniem gruppy bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Methods and algorithms for controlling the movement of a group of unmanned aerial vehicles], *Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte: Sb. nauchnykh trudov XII-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Integrated models and soft computing in artificial intelligence. Collection of scientific papers of the XII International Scientific and Technical Conference]. Kolomna: Universum, 2024, pp. 236-248.
3. 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-prakticheskiy zhurnal Informatizatsiya i svyaz'* [Scientific and practical journal Informatization and Communication], 2021, No. 3, pp. 7-11.
4. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Adaptivnoe upravlenie peredvizheniem kollektiva mobil'nykh robotov razvernutykh v liniyu [Adaptive control of the movement of a team of mobile robots deployed in a line], *Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte: Sb. nauchnykh trudov X-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Integrated models and soft computing in artificial intelligence. Collection of scientific papers of the X-th International Scientific and Technical Conference]. Smolensk: Universum, 2021, pp. 238-246.
5. Guzik V.F., Pereverzev V.A., P'yavchenko A.O., Saprykin R.V. Printsipy postroeniya ekstrapoliruyushchego mnogomernogo neyrosetevogo planirovshchika intellektual'noy sistemy pozitsionno-traektnornogo upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Principles of constructing an extrapolating multidimensional neural network planner for an intelligent system of position-trajectory control of moving objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 67-80.
6. Kostyukov V.A., Medvedev I.M., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh. Chislennoe modelirovanie roevogo algoritma planirovaniya puti v dvukhmernoy nekartografirovannoy srede [Numerical modeling of a swarm path planning algorithm in a two-dimensional unmapped environment], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2024, Vol. 16, No. 2, pp. 26-40.
7. Karpenko A.P. Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern algorithms of search engine optimization. Algorithms inspired by nature: a tutorial]. 3rd ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2021, 448 p.
8. Kuznetsov A.V. Model' dvizheniya i vzaimodeystviya sistemy intellektual'nykh agentov [Model of movement and interaction of a system of intelligent agents], *Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [VSU Bulletin. Series: Systems analysis and information technology], 2018, No. 2, pp. 130-138.

9. *Muslimov T.Z., Munasyrov R.A.* Detsentralizovannoe gruppovoe nelineynoe upravlenie stroem bespilotnykh letatel'nykh apparatov samoletnogo tipa [Decentralized group nonlinear control of a formation of aircraft-type unmanned aerial vehicles], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2020, Vol. 21, No. 1, pp. 43-50.
10. *Beloglazov D.A., Guzik V.F., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., P'yavchenko A.O., Saprykin R.V., Solov'ev V.V., Finaev V.I.* Intellektual'nye tekhnologii planirovaniya peremeshcheniy podvizhnykh ob'ektov v trekhmernykh nedeterminirovannykh sredakh [Intelligent technologies for planning the movements of moving objects in three-dimensional non-deterministic environments]. Moscow: Nauka, 2017, 232 p.
11. *Neydorf R.A., Polyakh V.V., Chernogorov I.V., Yarakhmedov O.T.* Issledovanie evristicheskikh algoritmov v zadachakh prokladki i optimizatsiya marshrutov v srede s prepyatstviyami [Study of heuristic algorithms in problems of route planning and optimization in an environment with obstacles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3 (176), pp. 127-143.
12. *Pshikhopov V.Kh. i dr.* Intellektual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob'ektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of trajectories of moving objects in environments with obstacles], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2014.
13. *Gayduk A.R., Mart'yanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., KHamdan N., Farkhud A.* Neyrosetevaya sistema upravleniya gruppoy robotov v neopredelennoy dvumernoy srede [Neural network control system for a group of robots in an uncertain two-dimensional environment], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2020, No. 21 (8), pp. 470-479.
14. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Control of moving objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011.
15. *Ivanov D.Ya.* Raspredelenie roley v koalitsiyakh robotov pri ogranichennykh kommunikatsiyakh na osnove roevogo vzaimodeystviya [Distribution of roles in robot coalitions with limited communications based on swarm interaction], *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sb. trudov* [Control of large systems: Collection of works], 2019, No. 78, pp. 23-45.
16. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V.* Algoritmy adaptivnykh pozitsionno-traektornykh sistem upravleniya podvizhnymi ob'ektami [Algorithms of adaptive position-trajectory control systems for moving objects], *Problemy upravleniya* [Problems of control], 2015, No. 4, pp. 66-74.
17. *Caro G.D., Ducatelle F.* AntHocNet: An adaptive nature inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks, *European Transactions on Telecommunications*, 2005, No. 16 (5), pp. 443-455.
18. *Chen S., Eshaghian M.M.* A fast recursive mapping algorithm. Department of computer and information science. New Jersey, USA: New Jersey, 2013, pp. 219-227.
19. *Fatemeh K.P., Reza S.N.* Comparing the Performance of Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization Algorithm for Mobile Robot Path Planning in the Dynamic Environments with Different Complexities, *Journal of Academic and Applied Studies*, 2013, Vol. 3 (2), pp. 29-44.
20. *Hoefler T., Snir M.* Generic Topology Mapping Strategies for Large-scale Parallel Architectures. University of Illinois, 2011, pp. 75-85.
21. *Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Management of Behavior of a Swarm of Robots Applicable to the Tasks of Monitoring a Some Territory, *Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms*. Springer, Czech Republic, 2020, Vol. 2, pp. 324-332.
22. *Makarenko S.I.* Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Robotic complexes for military purposes: current state and development prospects], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, communication and security systems], 2016, No. 2.

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; г. Москва, Россия; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; тел.: 89085135512; кафедра информатики; д.т.н.; профессор.

Бесхмельнов Максим Игоревич – e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; тел.: 89252622177; кафедра информатики; ассистент.

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; head of department; 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.

Beskhmelnov Maxim Igorevich – e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; phone: +79252622177; the Department of Computer Science; assistant.

П.Г. Ермаков

**ЗАДАЧА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА
НЕОБОРУДОВАННОГО ВЕРТОДРОМА**

Рассматривается задача многокритериальной оптимизации выбора того или иного необорудованного вертодрома для осуществления посадки на него беспилотным воздушным судном (БВС) вертолетного типа. Формализована задача многокритериальной оптимизации выбора вертодрома на основе удовлетворения требований международной организации гражданской авиации (ИКАО) к необорудованным вертодромам посредством минимизации оригинальной функции потерь, учитывающей следующую информацию: вероятность пригодности того или иного необорудованного вертодрома, вероятность отказа бортовой системы БВС вертолетного типа, неточность определения собственного местоположения воздушного судна, неточность позиционной информации цифровой карты местности и летно-технические характеристики БВС вертолетного типа. Определение пригодности необорудованного вертодрома по предельной высоте элементов рельефа его поверхности предложено осуществлять на основе статистической обработки данных лидарного сканирования подстилающей поверхности земли. Изложены математические постановки задачи принятия решения по посадке воздушного судна на неподготовленную площадку исходя из требований ИКАО к вертодрому по предельной высоте элементов рельефа и твердости грунта. Проведено сравнение вычислительных затрат алгоритмов выбора того или иного необорудованного вертодрома с помощью использования одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 Model B. Представлен результат имитационного моделирования разработанного оптимального алгоритма выбора необорудованного вертодрома для оценки его работоспособности в условиях вариабельности параметров вероятностной функции потерь на основе веб-сервиса OpenStreetMap и цифровой карты местности SRTM. Приведен результат решения задачи принятия решения по посадке БВС вертолетного на необорудованный вертодром на основе проведенного экспериментального лидарного сканирования поверхности земли.

Необорудованный вертодром; линейное программирование; вероятностная функция потерь; статистическая обработка данных.

P.G. Ermakov

**PROBLEM OF MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF SELECTION
OF AN UNPREPARED HELIDROM**

The problem of multi-criteria optimization of the choice of an unprepared helidrom to plant the unmanned aerial vehicle (UAV) helicopter type on it is considered in this article. The problem of multi-criteria optimization of the choice of an unprepared helidrom is formalized based on satisfying requirements of the International Civil Aviation Organization (ICAO) to an unprepared helidrom by minimizing the original loss function taking into account the following data: the probability of availability of an unprepared helidrom, the probability of failure of the UAV's helicopter type onboard system, the error of a digital elevation map (DEM) positional information, the error of the UAV's helicopter type coordinates information and the technical characteristics of the UAV helicopter type. It is proposed to determine the suitability of an unequipped helidrom based on the maximum height of terrain elements of its surface using statistical processing of a lidar earth scanning data. The mathematical formulations of the problem of decision-making on UAV helicopter type landing are proposed based on requirements for an unprepared helidrom in terms of maximum height of terrain elements and soil hardness. The comparison of the computational time of algorithms of the choice of an unprepared helidrom is completed using Raspberry Pi 3 Model B. The result of a simulation modelling of the proposed optimal algorithm of the choice of an unprepared helidrom for the estimation of its efficiency under conditions of variability of parameters of the probabilistic loss function using OpenStreetMap and SRTM is presented. The result of solving the problem of decision-making on UAV helicopter type landing based on a lidar earth scanning data is presented.

Unprepared helidrom; linear programming; probabilistic loss function; statistical data processing.

Введение. Сегодня на территории Российской Федерации из-за низкой плотности расположения оборудованных вертодромов, а также ввиду следующих факторов [1]:

- ◆ специфика возможных возлагаемых задач на беспилотное воздушное судно (БВС) вертолетного типа (осуществление доставки грузов в труднодоступные районы Земли, где создание необходимой инфраструктуры оборудованного вертодрома затруднено);

- ◆ ненулевая вероятность появления нештатной ситуации на борту БВС вертолетного типа;

- ◆ становится очевидным тот факт, что задача осуществления посадки БВС вертолетного типа на необорудованный вертодром является актуальной.

Ниже представлены требования ИКАО к необорудованному вертодрому:

- ◆ угол наклона необорудованного вертодрома не должен превышать 10° ;

- ◆ неровности на поверхности вертодрома не должны превышать 100 мм под трехметровой рейкой, укладываемой в зоне прохода опор воздушного аппарата;

- ◆ на удалении от края вертодрома до $1,5 D$ (D – диаметр несущего винта воздушного судна, м) за его пределами не должно быть элементов рельефа с высотой, превышающей 1 м;

- ◆ прочность грунта необорудованного вертодрома не должна быть менее 3 кгс/см^2 .

Решением задачи выбора необорудованной посадочной площадки для БВС вертолетного типа с помощью обработки изображений подстилающей поверхности земли занимались авторы [2]. Для исключения осуществления посадки воздушного судна на запрещенную поверхность (например, водоемы, объекты гражданской и военной инфраструктуры, гористая местность и др.) в режиме реального времени исследователями было предложено решение данной проблемы на основе нейросетевой обработки изображений подстилающей земной поверхности. В качестве нейросетевой модели ученые использовали самоорганизующуюся карту Кохонена, способную на борту воздушного судна определить разрешенные земные поверхности на текущем изображении для осуществления дальнейшей на них посадки. Авторы утверждают, что при решении данной задачи классификации с использованием нейросетевой модели, обученной в течение 10000 эпох на 2700 изображениях подстилающей поверхности, было выявлено ошибок первого рода – 21 % и ошибок второго рода – 0%.

Несколько схожей задачей определения типа грунта подстилающей поверхности занимались ученые из США [3]. Исследователи предложили алгоритм классификации типа земной поверхности на основе вероятностной нейронной сети на основе использования инерциальных данных для последующей реализации стратегии управления беспилотным наземным аппаратом (БНА). Формирование обучающей выборки происходило с помощью проезда БНА ATRVJr на трех разных земных поверхностях (гравий, асфальт и трава) при постоянной скорости движения аппарата: 0,6 м/с, 0,8 м/с, 1 м/с, 1,2 м/с, 1,4 м/с. Авторы утверждают следующее:

- ◆ на скорости 0,8 м/с движения БНА вероятность правильной классификации травы равняется 87%, вероятность правильной классификации гравия равняется 100%;

- ◆ на скорости 1,2 м/с движения БНА вероятность правильной классификации травы равняется 93%, вероятность правильной классификации гравия равняется 100%.

Далее перейдем к описанию математической постановки задачи многокритериальной оптимизации выбора того или иного необорудованного вертодрома для осуществления потенциальной на него посадки.

Априорное планирование маршрута облета необорудованных вертодромов, производимое в интересах обеспечения безопасной посадки БВС вертолетного типа. Планирование маршрута [4–17] облета необорудованных вертодромов будем производить с учетом суммарных потерь, затрачиваемых на потенциальный перелет к некоторому необорудованному вертодрому. Очевидно, что оптимальным маршрутом облета необорудованных вертодромов является тот, который минимизирует функцию суммарных потерь \mathcal{L}_Σ :

$$\mathcal{L}_\Sigma = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^{N+1} C_{i,j} x_{i,j} \rightarrow \min_{x_{i,j} \in \{0,1\}}, \quad (1)$$

где $C_{i,j}$ – функция потерь, учитывающая потери при потенциальном перелете от i -го необорудованного вертодрома к j -му (величина $C_{i,j}$ является безразмерной характеристикой); $x_{i,j}$ – решение по перелету от i -го необорудованного вертодрома к j -му. В случае положительного решения по перелету к j -му необорудованному вертодрому принимает значение 1 , в противном случае 0 .

Вид функции $C_{i,j}$ представим как:

$$C_{i,j} = (1 - \alpha)\beta \left(p_{\text{апр}}^- + \frac{\Delta m_{\text{ГП}}}{m_0} \right); \quad (2)$$

где α – весовой коэффициент, учитывающий риск отказа бортовых систем БВС в процессе перелета к необорудованному вертодрому, для оценки этой вероятности используется принятая в теории надежности экспоненциальная модель отказов; β – весовой коэффициент, являющийся мерой доверия к прогнозному времени на перелет БВС вертолетного типа к необорудованному вертодрому, расходуемого на перелет к тому или иному необорудованному вертодрому; $p_{\text{апр}}^-$ – вероятность непригодности вертодрома на основе статистической обработки ЦКМ; $\Delta m_{\text{ГП}}$ – количество затрачиваемого топлива двигателя внутреннего сгорания (ДВС) БВС вертолетного типа при осуществлении горизонтального полета; m_0 – текущий объем топливного бака БВС вертолетного типа.

Здесь $p_{\text{апр}}^-$ определяется следующим образом:

$$p_{\text{апр}}^- = 1 - \prod_{k=1}^3 p_k^j, \quad (3)$$

где k – индекс вероятности пригодности вертодрома по одному из первых трех требований к его рельефу.

Вероятность пригодности того или иного необорудованного вертодрома по требованию предельного угла наклона рассчитывается на основе гистограммы распределения оценок угла наклона необорудованного вертодрома, полученной при многократном повторе процесса оценивания угла наклона (оценка угла наклона вычисляется на основе метода наименьших квадратов [18]), в котором генерация случайных ошибок высот рельефа осуществляется с помощью метода Монте-Карло. Вероятности пригодности вертодрома по предельной высоте элементов рельефа вычисляются аналогично на основе метода Монте-Карло.

Принимая во внимание тот факт, что БВС вертолетного типа может посетить только один раз необорудованный вертодром, здесь ясно, что возвращение воздушного судна на стартовую позицию не предполагается, а при достижении финального вертодрома – вылет из него невозможен, то вводятся следующие ограничения (H_{in} – условное обозначение стартовой позиции БВС вертолетного типа, H_{out} – условное обозначение финального необорудованного вертодрома) при решении оптимизационной задачи (1):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N+1} x_{i,j} = 1, j = \overline{1, N+1}, i \neq j, i \neq H_{out}, j \neq H_{in}; \\ \sum_{j=1}^{N+1} x_{i,j} = 1, i = \overline{1, N+1}, i \neq j, i \neq H_{out}, j \neq H_{in}; \\ \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus S} x_{i,j} \geq 1, \forall S \subset V, S \neq \emptyset. \end{cases} \quad (4)$$

Математическая постановка задачи принятия решения по посадке БВС вертолетного типа на необорудованный вертодром на основе лидарного сканирования земной поверхности. В текущей работе вероятность пригодности необорудованного вертодрома по предельной высоте элементов рельефа на основе лидарного сканирования с помощью использования гистограммного метода запишется как:

$$p_{\text{рельеф}} = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_1} \frac{n_1^i}{n_1} \sum_{j=1}^{\mathcal{N}_2} \frac{n_2^j}{n_2}, \quad (5)$$

где n_1^i – количество высот элементов рельефа на поверхности области за пределом необорудованного вертодрома до 1,5 значения диаметра несущего винта БВС вертолетного типа, попавших в i -ый интервал гистограммы; n_1 – общее количество высот элементов рельефа поверхности области за пределом необорудованного вертодрома; \mathcal{N}_1 – количество столбиков гистограммы высот элементов рельефа на поверхности области за пределом необорудованной площадки, попавших в интервал $[0; 1 - \Delta_{\text{лидар}} - \Delta_{\text{ГП}}]$; $\Delta_{\text{лидар}}$ – предельная ошибка вычисления дальности до объекта лидаром; $\Delta_{\text{ГП}}$ – предельная ошибка счисления высоты воздушного судна в горизонтальном полете; n_2^j – количество высот элементов рельефа на поверхности необорудованного вертодрома, попавших в j -ый интервал гистограммы; n_2 – общее количество высот элементов рельефа на поверхности необорудованного вертодрома; \mathcal{N}_2 – количество столбиков гистограммы высот элементов рельефа на поверхности необорудованного вертодрома, попавших в интервал $[0; h_{\text{ф}} - \Delta_{\text{лидар}} - \Delta_{\text{ГП}}]$; $h_{\text{ф}}$ – высота нижней части фюзеляжа БВС вертолетного типа над поверхностью земли.

С учетом приведенного материала настоящей статьи процесс принятия решения по посадке БВС вертолетного типа на текущий вертодром или по перелету к следующему предлагается осуществлять на основе последовательного решения следующих оптимизационных задач.

Задача 1. Принятие решения по снижению с высоты осуществления горизонтального полета БВС вертолетного типа до рекомендуемой высоты дистанционного георадиолокационного зондирования [19, 20] / перелету к следующему необорудованному вертодрому. Математическая постановка запишется следующим образом:

$$\left(p_{\text{рельеф}}^- + \frac{\Delta m_c}{m_0} \right) D + \left((1 + \alpha) \gamma \left(p_{\text{апр}}^- + \frac{\Delta m_{\text{П1}} + \Delta m_{\text{ГП}}}{m_0} \right) \right) F \rightarrow \min_{\substack{D \in \{0;1\}, \\ F \in \{0;1\}}} \quad (6)$$

где D – решение по снижению БВС вертолетного типа до высоты георадиолокационного зондирования; F – решение по перелету БВС вертолетного типа к следующему необорудованному вертодрому; γ – весовой коэффициент, учитывающий неточность позиционирования ЦКМ и воздушного судна при прогнозировании времени перелета к следующему вертодрому; Δm_c – количество расходуемого топлива при спуске БВС вертолетного типа до рекомендуемой высоты проведения георадиолокационного облучения грунта вертодрома; $\Delta m_{\text{П1}}$ – количество затрачиваемого топлива при подъеме воздушного судна от высоты проведения лидарного сканирования подстилающей поверхности до высоты осуществления горизонтального полета.

Введем следующее ограничение для данной задачи: $D + F = 1$.

Задача 2. Принятие решения по посадке / перелету к следующему необорудованному вертодрому, математическая постановка данной задачи примет следующий вид:

$$R_{\text{грунт}} L + \left((1 + \alpha) \gamma \left(p_{\text{апр}}^- + \frac{\Delta m_{\text{П2}} + \Delta m_{\text{ГП}}}{m_0} \right) \right) F \rightarrow \min_{\substack{L \in \{0;1\}, \\ F \in \{0;1\}}} \quad (7)$$

где L – решение по посадке БВС вертолетного типа на текущий необорудованный вертодром; $R_{\text{грунт}}$ – потери от ложно-положительных решений (грунт неподходящий для посадки был классифицирован как подходящий) нейросетевого классификатора типа грунта необорудованного вертодрома [21]; $\Delta m_{\text{П2}}$ – количество затрачиваемого топлива при подъеме воздушного судна от рекомендуемой высоты георадиолокационного зондирования до высоты осуществления горизонтального полета.

Ограничение для задачи запишется как: $L + F = 1$.

Моделирование процесса построения оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов. Методом исследования рассматриваемой в настоящей статье задачи является имитационное математическое моделирование. Здесь отметим, что имитационное моделирование задачи планирования маршрута облета необорудованных площадок проводилось при следующих параметрах:

- ◆ высотная информации о рельефе земной поверхности: цифровая карта местности SRTM;
- ◆ географические координаты подходящего места осуществления посадки воздушного судна: веб-картографический сервис OpenStreetMap;
- ◆ летно-технические характеристики БВС вертолетного типа: ВРТ-300 КБ «ВР-Технологии».

На основе представленного выше материала схематично решение задачи построения оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов примет следующий вид (рис. 1).

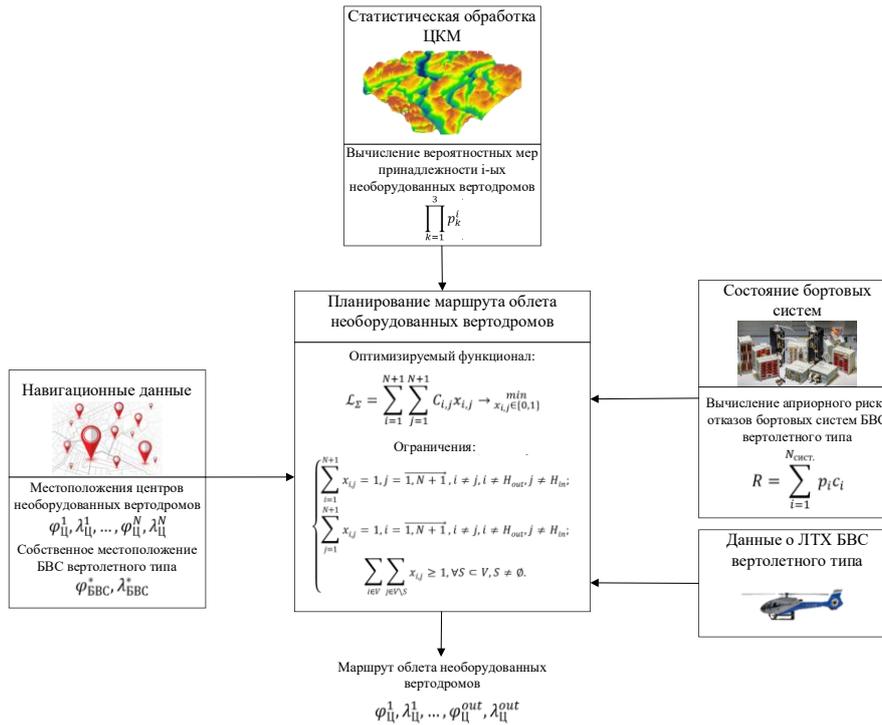


Рис. 1. Схема построения оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов

Для исследования предложенного в данном исследовании решения задачи построения оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов было разработано специальное программно-математическое обеспечение (ПМО) (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682103. Заявка № 2023681026 от 12.10.2023. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.10.2023). Далее представлен графический интерфейс разработанного специального ПМО (рис. 2).

В общем случае блок-схема предлагаемого алгоритм решения задачи оптимального построения маршрута облета необорудованных вертодромов приведена ниже (рис. 3). В работе для решения сформулированной задачи планирования маршрута облета необорудованных вертодромов предложен комбинированный алгоритм, основанный на сочетании точного алгоритма решения оптимизационной задачи (алгоритм Беллмана-Форда) и генетического / нейросетевого алгоритма. Использование того или иного алгоритма зависит от временных затрат на получение оптимального маршрута. Здесь отметим, что выбор допустимого времени на решение задачи планирования $T_{доп}$, фигурирующее в блоке 5 алгоритма, выходит за рамки данного исследования.

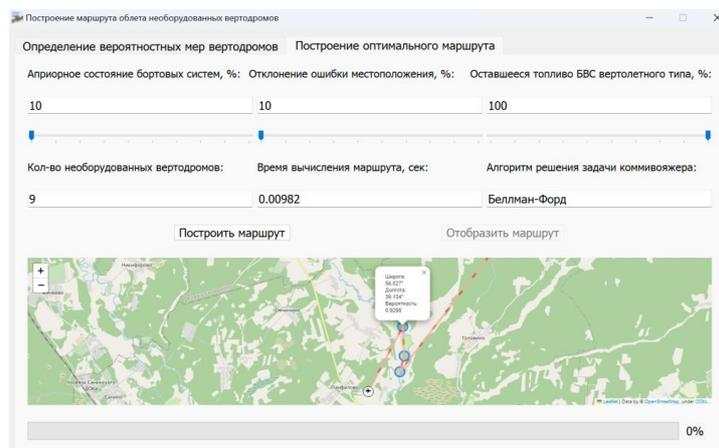


Рис. 2. Графический интерфейс специального ПМО планирования маршрута облета необорудованных вертодромов

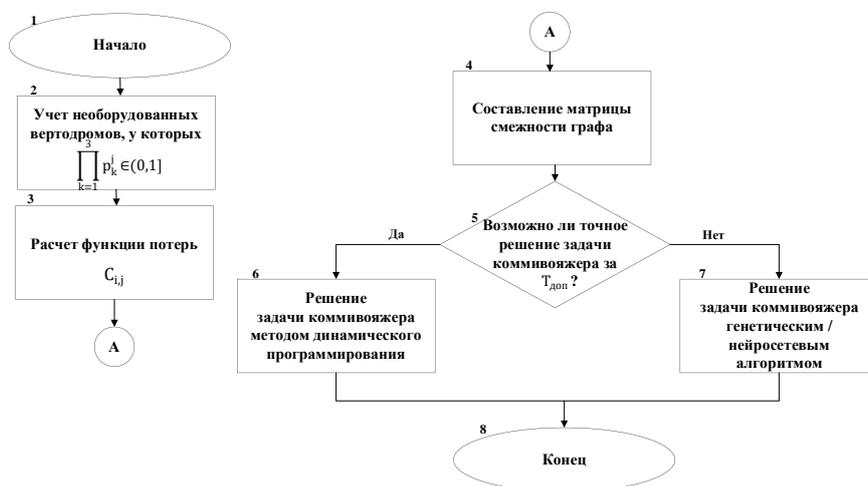


Рис. 3. Блок-схема алгоритма планирования маршрута облета необорудованных вертодромов

Обсуждение результатов проведенного исследования. Ниже представлена графическая зависимость (рис. 4) средней вероятности (10000 проведенных экспериментов планирования маршрута облета необорудованных вертодромов) выбираемого необорудованного вертодрома в процессе планирования оптимального маршрута облета необорудованных площадок от значения априорного риска отказов бортовых систем БВС вертолетного типа и от текущего объема топлива ДВС БВС вертолетного типа на основе использования веб-картографического сервиса OpenStreetMap и цифровой карты местности SRTM [22].

Вычислительная эффективность алгоритмов решения задачи планирования маршрута облета необорудованных вертодромов (рис. 5) производилась с помощью использования одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 Model B (процессор: 4-х ядерный ARMv8 Cortex-A53 Broadcom BCM2837B0; оперативная память: 1GB LPDDR2).

Ниже представлена графическая интерпретация принятия решения по снижению воздушного судна до рекомендуемой высоты георадиолокационного зондирования / перелету к следующей необорудованной площадке в ходе решения оптимизационной задачи (6) на основе экспериментального лидарного сканирования земной поверхности (рис. 6 и 7).

Вероятность выбираемого необорудованного вертодрома

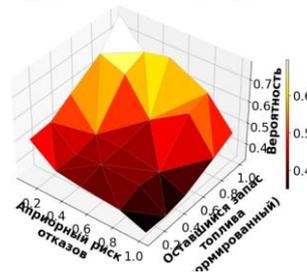


Рис. 4. Вероятность выбираемого необорудованного вертодрома

Вычислительная сложность решения задачи планирования

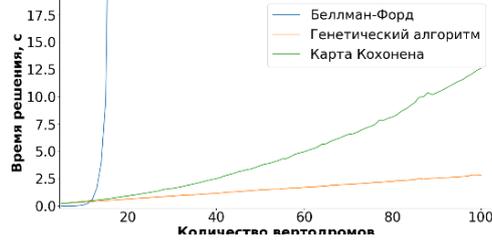
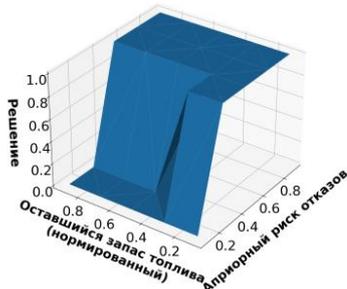


Рис. 5. Вычислительная сложность решения задачи планирования



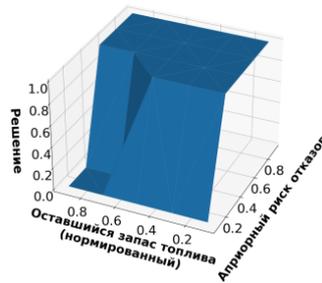
а) Внешний вид земной поверхности №1

Решение по снижению



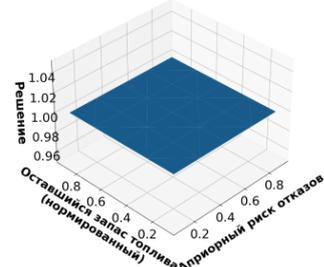
б) Поверхность решения по осуществлению снижения при $p_{\text{апр}} = 0,1$

Решение по снижению



в) Поверхность решения по осуществлению снижения при $p_{\text{апр}} = 0,5$

Решение по снижению



г) Поверхность решения по осуществлению снижения при $p_{\text{апр}} = 0,9$

Рис. 6. Графическая интерпретация принимаемого решения по снижению (подстилающая поверхность №1)



а) Внешний вид земной поверхности №2

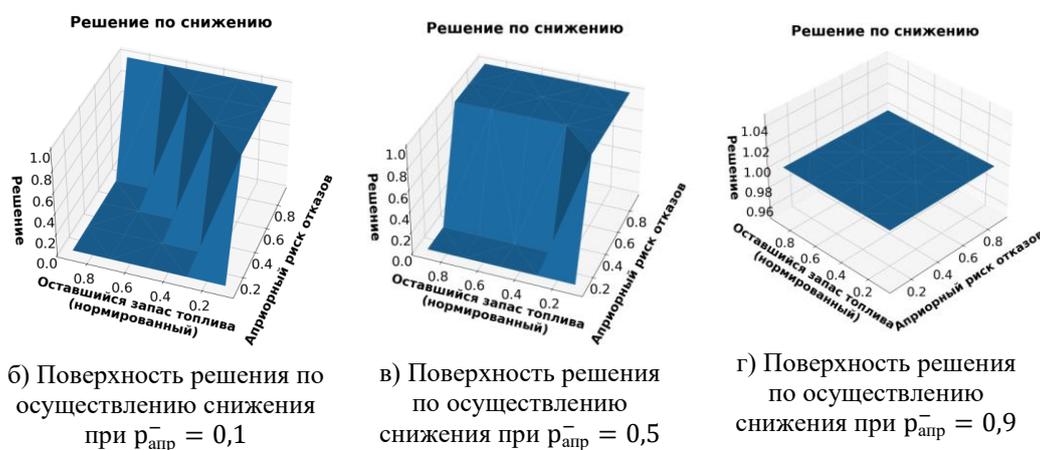
б) Поверхность решения по осуществлению снижения при $p_{\text{appr}} = 0,1$ в) Поверхность решения по осуществлению снижения при $p_{\text{appr}} = 0,5$ г) Поверхность решения по осуществлению снижения при $p_{\text{appr}} = 0,9$

Рис. 7. Графическая интерпретация принимаемого решения по снижению (подстилающая поверхность №2)

Заключение. В статье предложен алгоритм построения оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов с целью поиска площадки, пригодной для посадки с учетом требований к ее рельефу. Задача формирования оптимального маршрута сведена к задаче целочисленного линейного программирования, в которой за счет соответствующего описания функции потерь удастся учесть существенные факторы при выборе того или иного необорудованного вертодрома (вероятность пригодности необорудованного вертодрома, вероятность отказа бортовых средств воздушного судна, неточность позиционирования летательного аппарата, летно-технические характеристики воздушного судна). Принятие решения по осуществлению посадки БВС вертолетного типа на необорудованный вертодром предложено осуществлять с помощью последовательного решения следующих оптимизационных задач:

- ♦ задача по принятию решения по спуску до рекомендуемой высоты георадиолокационного зондирования / перелету воздушного судна к следующему необорудованному вертодрому;

- ♦ задача по принятию решения по посадке / перелету воздушного судна к следующей необорудованной площадке.

Проведено имитационное моделирование предложенного алгоритма планирования оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов, по результату которого можно говорить об адекватности используемых математических моделей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цуканов И.Р., Азман А.В. Решаемые проблемы, преимущества и перспективы развития беспилотных вертолетов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – Вып. 9.

2. *Альханов Д.С., Кузурман В.А., Гоголев А.А.* Оптическое детектирование перспективных посадочных зон для беспилотного воздушного судна вертолетного типа с помощью самоорганизующихся карт Кохонена // Вестник Московского авиационного института. – 2020. – Т. 29, № 3. – С. 209-221.
3. *DuPont E.M., Roberts R.G., Moore C.A.* Speed Independent Terrain Classification // 38th Southeastern Symposium on System Theory. March 2006.
4. *Андреев М.А., Миллер А.Б., Миллер Б.М., Степанян К.В.* Планирование траектории беспилотного летательного аппарата в сложных условиях при наличии угроз // Известия РАН. ТИСУ. – 2012. – № 2. – С. 66-176.
5. *Гончаренко В.И., Желтов С.Ю., Князь В.А., Лебедев Г.Н., Михайлин Д.А., Царева О.Ю.* Интеллектуальная система планирования групповых действий беспилотных летательных аппаратов при наблюдении наземных мобильных объектов на заданной территории // Известия РАН. ТИСУ. – 2021. – № 3. – С. 39-56.
6. *Evdokimenkov V.N., Krasilshchikov M.N., Kozorez D.A.* Development of Pre-flight Planning Algorithms for the Functional-program Prototype of a Distributed Intellectual Control System of Unmanned Flying Vehicle Groups // INCAS Bulletin. – 2019. – Vol. 11, No. 1. – P. 75-88.
7. *Евдокименков В.Н., Хохлов С.В.* Планирование групповых действий беспилотных летательных аппаратов в распределенной системе интеллектуального управления // ВКИТ. – 2022. – № 3. – С. 3-14.
8. *Евдокименков В.Н., Ермаков П.Г., Гоголев А.А.* Построение оптимального маршрута облета необорудованных вертодромов // ВКИТ. – 2023. – № 12. – С. 3-10.
9. *Xu Y., Che C.* A brief review of the intelligent algorithm for traveling salesman problem in UAV route planning // 2019 IEEE 9th international conference on electronics information and emergency communication (ICEIEC). – IEEE, 2019. – P. 1-7.
10. *Jang D.S., Chae H.J., Choi H.L.* Optimal control-based UAV path planning with dynamically-constrained TSP with neighborhoods // 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). – IEEE, 2017. – P. 373-378.
11. *Khoufi I., Laouiti A., Adjih C.* A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehicle routing problems for unmanned aerial vehicles // Drones. – 2019. – Vol. 3, No. 3. – P. 66.
12. *Cengiz E. et al.* Effects of variable UAV speed on optimization of travelling salesman problem with drone (TSP-D) // The International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 295-305.
13. *Yilmaz B.Y., Deniz S.N.* Multi uav based traffic control in smart cities // 2020 11th International conference on computing, communication and networking technologies (ICCCNT). – IEEE, 2020. – P. 1-7.
14. *Fu J. et al.* On hierarchical multi-UAV dubins traveling salesman problem paths in a complex obstacle environment // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2023. – Vol. 54, No. 1. – P. 123-135.
15. *Mersiovsky T. et al.* Optimal learning rate and neighborhood radius of Kohonen's self-organizing map for solving the travelling salesman problem // Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence. – 2018. – P. 54-59.
16. *Khachumov M.* An Approach to Formation Control of UAVs Based on Applying Adapted Kohonen Neural Network // 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – IEEE, 2023. – P. 258-261.
17. *Guan Q. et al.* Kohonen self-organizing map based route planning: A revisit // 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2021. – P. 7969-7976.
18. *Ермаков П.Г., Евдокименков В.Н., Гоголев А.А.* Определение угла наклона необорудованной посадочной площадки беспилотного воздушного судна вертолетного типа на основе информации цифровой карты местности // Тр. МАИ. – 2023. – № 132.
19. *Noviello C. et al.* An Overview on Down-Looking UAV-Based GPR Systems // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14. – P. 1- 28.
20. *Garcia-Fernandez M. et al.* UAV-mounted GPR for NDT application // 15th European Radar Conference (EuRAD). – 2018. – P. 2-5.
21. *Evdokimenkov V.N., Gogolev A.A. and Ermakov P.G.* Operational Control of an Unmanned Helicopter to Ensure an Emergency Safe Landing on an Unequipped Pad // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2024. – Vol. 63, No. 3. – P. 521-533.
22. *Yang L., Meng X., Zhang X.* SRTM DEM and its application advances // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Vol. 32, No. 14. – P. 3875-3896.

REFERENCES

1. *Tsukanov I.R., Azman A.V.* Reshaemye problemy, preimushchestva i perspektivy razvitiya bespilotnykh vertoletov [Problems to be solved, advantages and development prospects of unmanned helicopters], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2022, Issue 9.

2. Al'khanov D.S., Kuzurman V.A., Gogolev A.A. Opticheskoe detektirovanie perspektivnykh posadochnykh zon dlya bespilotnogo vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa s pomoshch'yu samoorganizuyushchikhsya kart Kokhonena [Optical detection of promising landing zones for an unmanned helicopter-type aircraft using self-organizing Kohonen maps], *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* [Bulletin of the Moscow Aviation Institute], 2020, Vol. 29, No. 3, pp. 209-221.
3. DuPont E.M., Roberts R.G., Moore C.A. Speed Independent Terrain Classification, *38th Southeastern Symposium on System Theory. March 2006*.
4. Andreev M.A., Miller A.B., Miller B.M., Stepanyan K.V. Planirovanie traektorii bespilotnogo letatel'nogo apparata v slozhnykh usloviyakh pri nalichii ugroz [Planning the trajectory of an unmanned aerial vehicle in difficult conditions in the presence of threats], *Izvestiya RAN. TISU* [Bulletin of the RAS. TISU], 2012, No. 2, pp. 66-176.
5. Goncharenko V.I., Zheltov S.YU., Knyaz' V.A., Lebedev G.N., Mikhaylin D.A., TSareva O.Yu. Intellektual'naya sistema planirovaniya gruppovykh deystviy bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri nablyudenii nazemnykh mobil'nykh ob'ektov na zadannoy territorii [Intelligent system for planning group actions of unmanned aerial vehicles when observing ground mobile objects in a given territory], *Izvestiya RAN. TISU* [Bulletin of the RAS. TISU], 2021, No. 3, pp. 39-56.
6. Evdokimenkov V.N., Krasilshchikov M.N., Kozorez D.A. Development of Pre-flight Planning Algorithms for the Functional-program Prototype of a Distributed Intellectual Control System of Unmanned Flying Vehicle Groups, *INCAS Bulletin*, 2019, Vol. 11, No. 1, pp. 75-88.
7. Evdokimenkov V.N., Khokhlov S.V. Planirovanie gruppovykh deystviy bespilotnykh letatel'nykh apparatov v raspredelennoy sisteme intellektual'nogo upravleniya [Planning group actions of unmanned aerial vehicles in a distributed intelligent control system], *VKIT* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2022, No. 3, pp. 3-14.
8. Evdokimenkov V.N., Ermakov P.G., Gogolev A.A. Postroenie optimal'nogo marshruta obleta neoborudovannykh vertodromov [Construction of an optimal flight route around unequipped heliports], *VKIT* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2023, No. 12, pp. 3-10.
9. Xu Y., Che C. A brief review of the intelligent algorithm for traveling salesman problem in UAV route planning, *2019 IEEE 9th international conference on electronics information and emergency communication (ICEIEC)*. IEEE, 2019, pp. 1-7.
10. Jang D.S., Chae H.J., Choi H.L. Optimal control-based UAV path planning with dynamically-constrained TSP with neighborhoods, *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. IEEE, 2017, pp. 373-378.
11. Khoufi I., Laouiti A., Adjih C. A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehicle routing problems for unmanned aerial vehicles, *Drones*, 2019, Vol. 3, No. 3, pp. 66.
12. Cengiz E. et al. Effects of variable UAV speed on optimization of travelling salesman problem with drone (TSP-D), *The International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 295-305.
13. Yilmaz B.Y., Denizler S.N. Multi uav based traffic control in smart cities, *2020 11th International conference on computing, communication and networking technologies (ICCCNT)*. IEEE, 2020, pp. 1-7.
14. Fu J. et al. On hierarchical multi-UAV dubins traveling salesman problem paths in a complex obstacle environment, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2023, Vol. 54, No. 1, pp. 123-135.
15. Mersiovsky T. et al. Optimal learning rate and neighborhood radius of Kohonen's self-organizing map for solving the travelling salesman problem, *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence*, 2018, pp. 54-59.
16. Khachumov M. An Approach to Formation Control of UAVs Based on Applying Adapted Kohonen Neural Network, *2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. IEEE, 2023, pp. 258-261.
17. Guan Q. et al. Kohonen self-organizing map based route planning: A revisit, *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2021, pp. 7969-7976.
18. Ermakov P.G., Evdokimenkov V.N., Gogolev A.A. Opredelenie ugla naklona neoborudovannoy posadochnoy ploshchadki bespilotnogo vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa na osnove informatsii tsifrovoy karty mestnosti [Determination of the angle of inclination of an unequipped landing pad of an unmanned aerial vehicle of a helicopter type based on information from a digital terrain map], *Tr. MAI* [Proceedings of MAI], 2023, No. 132.
19. Noviello C. et al. An Overview on Down-Looking UAV-Based GPR Systems, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, pp. 1-28.
20. Garcia-Fernandez M. et al. UAV-mounted GPR for NDT application, *15th European Radar Conference (EuRAD)*, 2018, pp. 2-5.

21. Evdokimenkov V.N., Gogolev A.A. and Ermakov P.G. Operational Control of an Unmanned Helicopter to Ensure an Emergency Safe Landing on an Unequipped Pad, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2024, Vol. 63, No. 3, pp. 521-533.
22. Yang L., Meng X., Zhang X. SRTM DEM and its application advances, *International Journal of Remote Sensing*, 2011, Vol. 32, No. 14, pp. 3875-3896.

Ермаков Павел Григорьевич – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: pavel-ermakov-1998@mail.ru; тел.: 89854612510; аспирант.

Ermakov Pavel Grigor'evich – Moscow Aviation Institute; e-mail: pavel-ermakov-1998@mail.ru; phone: +79854612510; postgraduate.

УДК 007.52 + 621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-201-209

А.А. Хачатрян, Е.С. Брискин

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМИ ПРИВОДАМИ РОБОТА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Эксплуатация роботов на вертикальных и близких к ним поверхностях имеет широкие перспективы в силу необходимости выполнения на них достаточно большого количества технологических операций с одной стороны и сложности использования ручного труда – с другой стороны. Рассматривается движение мобильного робота по вертикальной поверхности. Движение робота и его удержание на поверхности осуществляется посредством работы двух линейных приводов, оказывающих на него давление, и опирающихся на платформы, способные перемещаться по горизонтальной поверхности. Робот и платформа имеют колеса роляного типа, работающие в одном из двух режимов – свободном и тормозном. При этом тормозные устройства обеспечивают надежное сцепление колес с соответствующими поверхностями. Предложена расчетная схема и математическая модель робототехнической системы, использующей усилие линейных приводов для перемещения робота по вертикальной ровной поверхности. Решена задача динамики движения мобильного робота, перемещение которого по рабочей поверхности осуществляется за счет управления величиной и направлением усилий, развиваемых актуаторами и выбора заторможенных опор, обеспечивающих устойчивый режим движения. Рассмотрен процесс движения, состоящий из трех этапов, на каждом из которых одна из опор робота заторможена, при этом все опоры платформ на горизонтальной поверхности также заторможены. При переходе между этапами движения мобильный робот совершает остановку перед тем, как сменить заторможенное колесо, после чего возобновляется движение. Силами трения между расторможенными опорами робота и рабочей поверхностью пренебрегается. Получены уравнения и траектория движения центра масс мобильного робота. Представлены зависимости длин линейных приводов механизма прижатия от координат центра масс робота. Проведено имитационное моделирование, в результате которого определены диапазоны изменений длин линейных приводов и развиваемые усилия, обеспечивающие требуемое перемещение.

Мобильные робототехнические средства; перемещение; математическая модель; имитационное моделирование; задача динамики; робот вертикального перемещения; движение по вертикальной поверхности.

A.A. Khachatryan, E.S. Briskin

FEATURES OF CONTROL OF LINEAR DRIVES OF A ROBOT WHEN ITS MOVEMENT ON A VERTICAL SURFACE

The operation of robots on vertical and close to them surfaces has broad prospects due to the need to perform a sufficiently large number of technological operations on them on the one hand and the complexity of using manual labor on the other hand. The movement of a mobile robot along a vertical surface is considered. The movement of the robot and its retention on the surface is carried out through the operation of two linear actuators that exert pressure on it and rely on platforms capable of moving along a horizontal surface. The robot and the platform have piano-type wheels operating in one of two modes – free

and brake. At the same time, the braking devices ensure reliable adhesion of the wheels to the corresponding surfaces. A design scheme and a mathematical model of a robotic system using the force of linear actuators to move the robot along a vertical flat surface are proposed. The problem of the dynamics of the movement of a mobile robot has been solved, the movement of which along the working surface is carried out by controlling the magnitude and direction of the efforts developed by the actuators and the choice of inhibited supports that ensure a stable mode of movement. The process of movement is considered, consisting of three stages, at each of which one of the robot's supports is braked, while all the supports of the platforms on the horizontal surface are also braked. During the transition between the stages of movement, the mobile robot makes a stop before changing the braked wheel, after which movement resumes. The friction forces between the disinhibited robot supports and the work surface are neglected. The equations and trajectories of the motion of the center of mass of the mobile robot are obtained. The dependences of the lengths of the linear drives of the clamping mechanism on the coordinates of the center of mass of the robot are presented. Simulation modeling was carried out, as a result of which the ranges of changes in the lengths of linear actuators and the forces developed to ensure the required displacement were determined.

Mobile robotics; displacement; mathematical model; simulation modeling; the task of dynamics; movement on a vertical surface.

Введение. Учитывая особые условия осуществления тех или иных технологических операций на вертикальных и близких к ним поверхностях, эксплуатация роботов, способных перемещаться по таким поверхностям, имеет широкие перспективы. Области применения этих машин варьируются от осмотра и контроля мостов, трубопроводов, ветрогенераторов до очистки стен и фасадов высотных зданий [1–3]. Основная причина их применения – повышение эффективности работ, исключив дорогостоящую сборку строительных лесов, и защита здоровья и безопасности людей при выполнении опасных работ.

Существуют различные виды роботов, способных перемещаться по наклонным и вертикальным поверхностям за счет вакуумных устройств [4–6], электромагнитного взаимодействия [7, 8], тросовых движителей [9, 10] или адгезии [11, 12]. Основными ограничениями применения указанных движителей являются требования к поверхности, по которой необходимо перемещаться и к ее ориентации [13–18]. Рассматривается движение робота, опирающегося на вертикальную поверхность за счет прижатия к ней двумя «толкающими» актуаторами. Каждый актуатор установлен одним концом на платформе, перемещающейся по горизонтальной поверхности. За счет работы двух линейных приводов и осуществляется реализация усилия «прижатия» робота к вертикальной поверхности [19].

1. Постановка задачи. Ставится задача разработки программных режимов управляемого движения изучаемого робота, обеспечивающих требуемое перемещение его центра масс и ориентацию в пространстве. Программное управление должно обеспечиваться выдвиганием штоков двух линейных приводов механизма прижатия, развивающих необходимое усилие для обеспечения требуемого перемещения.

2. Расчетная схема робототехнической системы с двумя опорами на горизонтальную поверхность. Для проведения имитационного моделирования обосновывается расчетная схема изучаемой робототехнической системы с двумя линейными приводами (Рис. 1 (а)). Рассматривается движение робототехнической системы, состоящей из робота 1, представленного на рис. 1 характерной поверхностью S , перемещающегося по вертикальной (рабочей) поверхности 2, опираясь на нее тремя опорами 3-5. Требуемое перемещение робота реализуется за счет усилий P_1 и P_2 , приложенных со стороны двух линейных приводов механизма прижатия 6, закрепленных на горизонтальной (опорной) поверхности 7. Изучается вращательное движение мобильного робота вокруг заторможенных поочередно опор 3 и 4 при расторможенных остальных опорах и воздействии усилиями P_1 и P_2 со стороны механизма прижатия на мобильного робота. При этом опоры платформ на горизонтальной поверхности заторможены.

При описании расчетной схемы использованы следующие обозначения: C – центр масс робота; k – расстояние от заторможенной опоры 3 или 4 (оси вращения) до центра масс робота; $x_{оп1}$, $x_{оп2}$, $y_{оп1}$, $y_{оп2}$ – соответственно горизонтальные и вертикальные координаты оснований линейных приводов механизма прижатия робота в плоскости XOY ; δ_1 , δ_2 – углы между усилиями P_1 и P_2 и отрицательным направлением оси Z соответственно; ε_1 , ε_2 – углы между проекциями усилий P_1 и P_2 на плоскость XOY и осью Y соответ-

ственно; φ – угол поворота мобильного робота вокруг заторможенной опоры; $l_1, l_2, l_{xy1}, l_{xy2}$ – длины линейных приводов механизма прижатия и их проекции на плоскость XOY соответственно; P_{xy1}, P_{xy2} – проекции усилий P_1 и P_2 на плоскость XOY соответственно; h_1, h_2 – расстояния от оси вращения до линий действия усилий P_1 и P_2 в плоскости XOY соответственно.

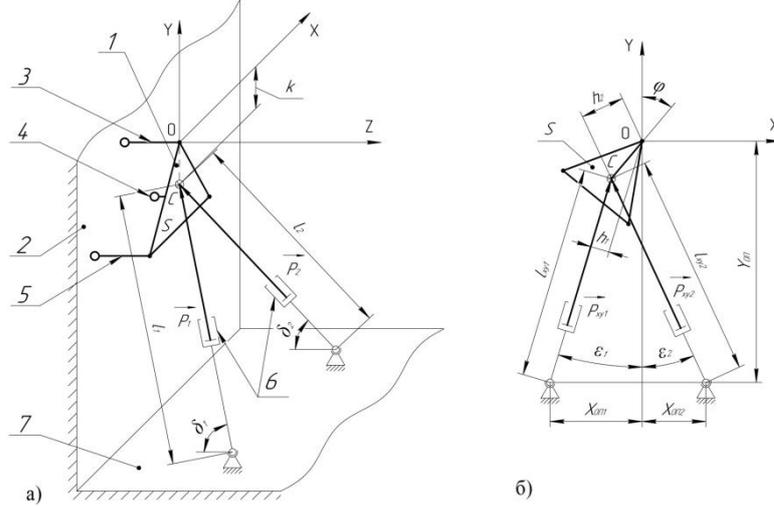


Рис. 1. Расчетная схема робота с двумя линейными приводами:
 а – общий вид робототехнической системы; б – проекция робототехнической системы на плоскость XOY

3. Метод решения. При определении параметров механизма прижатия, обеспечивающих требуемое перемещение центра масс робота, принимается, что усилия прижатия двух линейных приводов P_1 и P_2 обеспечивают вращательное движение робота вокруг неподвижной опоры. Силами трения между расторможенными опорами и рабочей поверхностью пренебрегается. Рассматриваемый процесс движения состоит из трех этапов, на каждом из которых одна из опор робота должна быть заторможена с целью обеспечения устойчивого режима движения. На первом и третьем этапах вращение происходит относительно неподвижной опоры 3, на втором – относительно неподвижной опоры 5 [20]. Таким образом, поочередным торможением необходимых опор и воздействием усилиями двух линейных приводов P_1 и P_2 достигается требуемая траектория движения робота.

Представлены зависимости для первого этапа движения: вращение робота вокруг заторможенной опоры 3, совпадающей с осью Z . Уравнение вращательного движения в дифференциальной форме представляется в виде:

$$I_z \ddot{\varphi} = M_z, \quad (1)$$

где I_z – момент инерции мобильного робота относительно оси Z , проходящей через опору 3; M_z – главный момент внешних сил, действующих на мобильного робота относительно оси Z :

$$M_z = P_{xy1} h_1 + P_{xy2} h_2 - F_{\text{тяж}} k \sin \varphi. \quad (2)$$

Для решения поставленной задачи задается закон движения мобильного робота по вертикальной поверхности (зависимостью изменения угла поворота робота вокруг заторможенной опоры от времени в плоскости XOY):

$$\varphi = at^3 + bt^2 + ct + d, \quad (3)$$

где a, b, c, d – неизвестные, определяемые при заданных граничных условиях.

Координаты центра масс робота x_c и y_c в момент времени t , можно вычислить:

$$\begin{cases} x_c = -k \sin \varphi; \\ y_c = -k \cos \varphi. \end{cases} \quad (4)$$

Зависимость длин линейных приводов механизма прижатия от координат центра масс робота можно задать следующими выражениями:

$$l_1 = \frac{\sqrt{(x_c - x_{оп1})^2 + (y_c - y_{оп1})^2}}{\sin \delta_1}. \quad (5)$$

$$l_2 = \frac{\sqrt{(x_c - x_{оп2})^2 + (y_c - y_{оп2})^2}}{\sin \delta_2}. \quad (6)$$

Полученные зависимости позволяют решить дифференциальное уравнение (1) и построить траекторию движения мобильного робота.

4. Имитационное моделирование. Целью имитационного моделирования является определение величин выдвигания исполнительных штоков и развиваемых усилий линейных приводов механизма прижатия, обеспечивающих требуемое перемещение разрабатываемой робототехнической системы.

Для решения уравнения (1) и построения траектории движения мобильного робота задаются начальные и граничные условия при движении робота по рабочей поверхности и необходимые массово-геометрические параметры робототехнической системы (табл. 1). При этом время τ для каждого из этапов принимается равным трем секундам.

Таблица 1

Исходные данные для имитационного моделирования

I Этап (вращение относительно опоры 3)	Начальные условия при $t = 0$ с	$\varphi_0 = 0$ рад	$\dot{\varphi}_0 = 0$ с ⁻¹ $\dot{\varphi}_\tau = 0$ с ⁻¹
	Граничные условия при $t = 3$ с	$\varphi_\tau = \pi/2$	
II Этап (вращение относительно опоры 5)	Начальные условия при $t = 3$ с	$\varphi_0 = \pi/6$	
	Граничные условия при $t = 6$ с	$\varphi_\tau = 2\pi/3$	
III Этап (вращение относительно опоры 3)	Начальные условия при $t = 6$ с	$\varphi_0 = 0$ рад	
	Граничные условия при $t = 9$ с	$\varphi_\tau = \pi/2$	
Массово-геометрические параметры	$I_z = 3,5$ кг·м ²	$m = 8$ кг	$k = 0,5$ м
	$x_{оп1} = -0,15$ м	$x_{оп2} = 0,5$ м	$\delta_1 = \delta_2 = 60^\circ$
	$y_{оп1} = -2,6$ м	$y_{оп2} = -2,6$ м	$x_O = y_O = 0$ м

Получены зависимости угла поворота мобильного робота вокруг заторможенной опоры от времени для каждого из этапов движения с учетом указанных исходных данных:

- ♦ для I и III этапов

$$\varphi = -\frac{\pi}{\tau^3} t^3 + \frac{3\pi}{2\tau^2} t^2; \quad (7)$$

- ♦ для II этапа

$$\varphi = -\frac{\pi}{\tau^3} t^3 + \frac{3\pi}{2\tau^2} t^2 + \frac{\pi}{6}. \quad (8)$$

Используя приведенные выражения, получены графики зависимости координат центра масс мобильного робота x_c и y_c от длин l_1 и l_2 линейных приводов механизма прижатия (рис. 2) для определения его перемещения по рабочей поверхности (рис. 3 представлена траектория движения робота на рабочей поверхности (в плоскости XOY)).

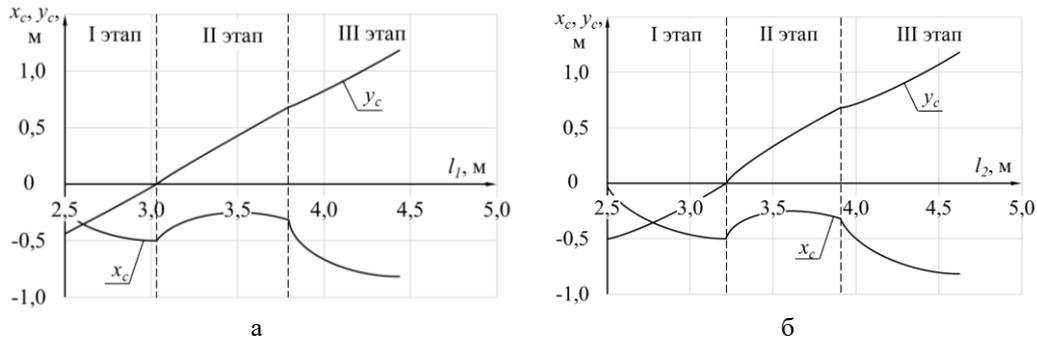


Рис. 2. Графики зависимости координат центра масс робота x_c и y_c от: а – длины l_1 линейного привода механизма прижатия; б – длины l_2 линейного привода механизма прижатия

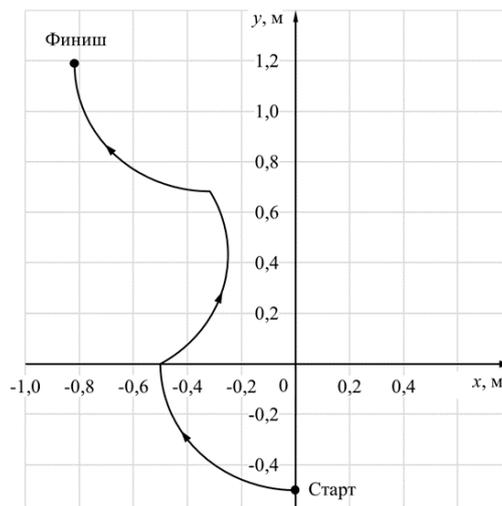


Рис. 3. Траектория движения центра масс робота.

Вычислены значения усилий P_1 и P_2 , возникающих на штоках линейных приводов механизма прижатия, обеспечивающие требуемое перемещение мобильного робота по рабочей поверхности. Получены графики зависимости этих усилий от длин соответствующих линейных приводов, представленные на рис. 4 и 5.

В результате выполненных расчетов получены диапазоны изменений длин первого и второго линейных приводов механизма прижатия l_1 от 2,4 м до 4,4 м и l_2 от 2,5 м до 4,6 м соответственно. При этом усилия P_1 и P_2 принимают одинаковые значения от 27 Н до 100 Н за счет распределения системой управления значений вращающих моментов мобильного робота относительно неподвижной опоры между двумя приводами. Исключением является начало движения на первом этапе, где усилия на первом линейном приводе не возникают $P_1 = 0$ Н (привод отключен), что связано с выбором исходных данных для моделирования. Иначе, в начальный момент времени усилие первого линейного привода противодействовало бы движению мобильного робота.

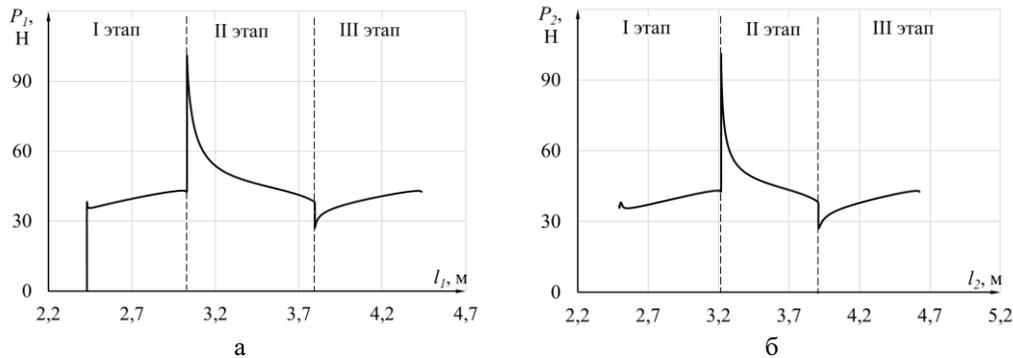


Рис. 4. Графики зависимости усилий P_1 и P_2 , возникающих на штоках линейных приводов механизма прижатия от их длин l_1 (а) и l_2 (б) соответственно

Получены также графики зависимости усилия P_2 , от длины линейного привода l_2 для робототехнической системы с одним и с двумя приводами, представленные на рис. 5. В случае с одним приводом значения усилия достигают 345 Н, что в 3,5 раза больше аналогичных значений, при использовании двух приводов.

При переходе между этапами движения мобильный робот совершает остановку, перед тем как сменить заторможенное колесо, после чего возобновляет движение, в связи с этим на границах этапов наблюдаются скачки значений усилия линейных приводов.

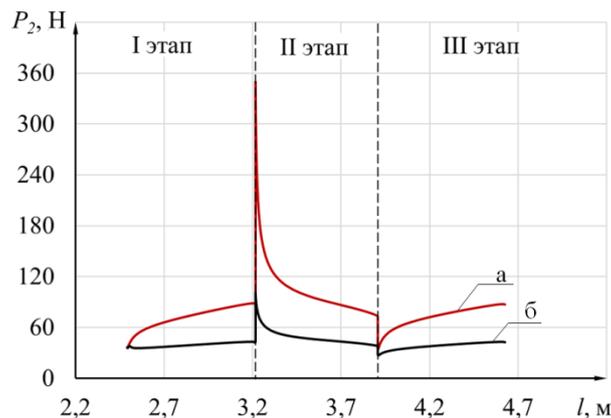


Рис. 5. Графики зависимости усилия P_2 , от длины линейного привода механизма прижатия l_2 для робототехнической системы: а – с одним линейным приводом; б – с двумя линейными приводами

Выводы. Решена задача определения перемещения центра масс мобильного робота по вертикальной поверхности с использованием двух линейных приводов:

- ◆ получены уравнения и траектория движения робота;
- ◆ получены зависимости длин линейных приводов от координат центра масс робота, диапазоны изменений длин актуаторов от 2,4 м до 4,6 м;
- ◆ вычислены значения усилий P_1 и P_2 , возникающих на штоках линейных приводов (не более 100 Н), обеспечивающие требуемое перемещение.

Полученные результаты позволяют установить требуемые программные режимы движения робота, обеспечиваемые изменением длин линейных приводов разрабатываемой робототехнической системы.

Результаты исследования необходимы и для создания системы управления робота, использующего два линейных привода при перемещении по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям, и обеспечения устойчивости его движения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Silva Manuel & Tenreiro Machado José*. A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion. – 2010. – 10.5772/8826.
2. *Градецкий В.Г., Вешиников В.Б., Калинин С.В., Кравчук Л.Н.* Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / Российская акад. наук, Ин-т проблем механики. – М.: Наука, 2001. – 359 с.
3. *Silva Manuel & Tenreiro Machado José & Tar József*. A Survey of Technologies for Climbing Robots Adhesion to Surfaces // ICCS 2008 - IEEE 6th International Conference on Computational Cybernetics, Proceedings. – 2008. – P. 127-132.
4. *Князьков М.М., Семенов Е.А.* Диагностический робототехнический комплекс вертикального перемещения // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – № 24 (127). – С. 43-46. – EDN RSEZEB.
5. *Lee Giuk & Kim Hwang & Seo Kunchan & Kim Jongwon & Kim Hong*. MultiTrack: A multi-linked track robot with suction adhesion for climbing and transition // Robotics and Autonomous Systems. – 2015. – 72. – 10.1016/j.robot.2015.05.011.
6. *Kim Hwang & Seo Kunchan & And Kyuhee & Kim Jongwon*. Development of a Multi-Body Wall Climbing Robot With Tracked Wheel Mechanism. – 2010. – 10.1142/9789814329927_0055.
7. *Matsumura Yodai & Shiba Takehiro & Ito Satoshi & Kawase Yuya & Takada Yogo*. Development of Magnetic Bridge Inspection Robot Aimed at Carrying Heavy Loads // International Journal of Robotic Engineering. – 2018. – 3. – P. 1-10. – 10.35840/2631-5106/4110.
8. *Tavakoli Mahmoud & Viegas Carlos & Marques Lino & Pires J. Norberto & de Almeida Anibal*. OmniClimbers: Omnidirectional magnetic wheeled climbing robots for inspection of ferromagnetic structures // Robotics and Autonomous Systems. – 2013. – 61. – 10.1016/j.robot.2013.05.005.
9. *Ефимов М.И., Брискин Е.С., Шаронов Н.Г.* О перемещении тросового робота по вертикальной поверхности // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019): Сб. трудов конференции, Москва, 04–06 декабря 2019 года. – М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2020. – С. 468-471. – EDN IOCHJR.
10. *Шаронов Н.Г., Ефимов М.И.* О перемещении роботов по вертикальной шероховатой поверхности с помощью тросовых движителей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 3 (226). – С. 51-54. – EDN ZARJYD.
11. *Daltorio Kathryn and Wei Terence and Horchler Andrew and Southard Lori and Wile Gregory and Quinn Roger and Gorb Stanislav and Ritzmann Roy*. Mini-Whegs TM Climbs Steep Surfaces Using Insect-inspired Attachment Mechanisms // I. J. Robotic Res. – 2009. – Vol. 28. – P. 285-302.
12. *Daltorio Kathryn & Horchler Andrew & Gorb Stanislav & Ritzmann Roy & Quinn Roger*. A small wall-walking robot with compliant, adhesive feet. – 2005. – P. 3648-3653. – 10.1109/IROS.2005.1545596.
13. *Сырых Н.В., Чащухин В.Г.* Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 5. – С. 163-173.
14. *Градецкий В.Г., Князьков М.М.* Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 1 (2). – С. 9-16.
15. *Серебряный В.В., Бошляков А.А., Калинин С.В., Огородник А.И., Коновалов К.В.* Шагающий робот для перемещения по вертикальным и произвольно ориентированным в пространстве поверхностям // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – 22 (11). – P. 585-593.
16. *Побегайлов О.А., Кравченко И.В., Кожуховский С.О.* Мобильные роботы вертикального перемещения // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 4 (14). – С. 85-95.
17. *Nansai Shunsuke & Mohan Rajesh Elara*. A Survey of Wall Climbing Robots: Recent Advances and Challenges // Robotics. – 2016. – 5. 14. – 10.3390/robotics5030014.
18. *Unver O. & Uneri Ali & Aydemir Alper & Sitti M.* Geckobot: A gecko inspired climbing robot using elastomer adhesives // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2006. – P. 2329-2335. – 10.1109/ROBOT.2006.1642050.

19. *Хачатрян А.А., Брискин Е.С.* О перемещении мобильного робота по произвольно ориентированным поверхностям // Известия ВолгГТУ. – 2022. – № 9 (268). – С. 86-93.
20. *Хачатрян А.А., Смирная Л.Д.* Особенности динамики управляемого движения робота, опирающегося на различно ориентированные ровные поверхности // Известия ВолгГТУ. – 2024. – № 4 (287). – С. 84-87.

REFERENCES

1. *Silva Manuel & Tenreiro Machado José.* A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion, 2010. 10.5772/8826.
2. *Gradetskiy V.G., Veshnikov V.B., Kalinichenko S.V., Kravchuk L.N.* Upravlyаемое dvizhenie mobil'nykh robotov po proizvol'no orientirovannym v prostranstve poverkhnostyam [Controlled motion of mobile robots on surfaces arbitrarily oriented in space], Russian Academy of Sciences, Institute of Problems in Mechanics. Moscow: Nauka, 2001, 359 p.
3. *Silva Manuel & Tenreiro Machado José & Tar József.* A Survey of Technologies for Climbing Robots Adhesion to Surfaces, *ICCC 2008 - IEEE 6th International Conference on Computational Cybernetics, Proceedings*, 2008, pp. 127-132.
4. *Knyaz'kov M.M., Semenov E.A.* Diagnosticheskiy robototekhnicheskiy kompleks vertikal'nogo peremeshcheniya [Diagnostic robotic complex for vertical movement], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 2013, No. 24 (127), pp. 43-46. EDN RSEZEB.
5. *Lee Giuk & Kim Hwang & Seo Kunchan & Kim Jongwon & Kim Hong.* MultiTrack: A multi-linked track robot with suction adhesion for climbing and transition, *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 72. 10.1016/j.robot.2015.05.011.
6. *Kim Hwang & Seo Kunchan & And Kyuhee & Kim Jongwon.* Development of a Multi-Body Wall Climbing Robot With Tracked Wheel Mechanism, 2010. 10.1142/9789814329927_0055.
7. *Matsumura Yodai & Shiba Takehiro & Ito Satoshi & Kawase Yuya & Takada Yogo.* Development of Magnetic Bridge Inspection Robot Aimed at Carrying Heavy Loads, *International Journal of Robotic Engineering*, 2018, 3, pp. 1-10. 10.35840/2631-5106/4110.
8. *Tavakoli Mahmoud & Viegas Carlos & Marques Lino & Pires J. Norberto & de Almeida Anibal.* OmniClimbers: Omnidirectional magnetic wheeled climbing robots for inspection of ferromagnetic structures, *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61. 10.1016/j.robot.2013.05.005.
9. *Efimov M.I., Briskin E.S., Sharonov N.G.* O peremeshchenii trosovogo robota po vertikal'noy poverkhnosti [On the movement of a cable robot along a vertical surface], *XXXI Mezhdunarodnaya innovatsionnaya konferentsiya molodykh uchenykh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUS - 2019): Sb. trudov konferentsii, Moskva, 04–06 dekabrya 2019 goda* [XXXI International Innovative Conference of Young Scientists and Students on Mechanical Engineering Problems (MIKMUS - 2019): Conference Proceedings, Moscow, December 4-6, 2019]. Moscow: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova Rossiyskoy akademii nauk, 2020, pp. 468-471. EDN IOCHJR.
10. *Sharonov N.G., Efimov M.I.* O peremeshchenii robotov po vertikal'noy sherokhovatoy poverkhnosti s pomoshch'yu trosovykh dvizhiteley [On the movement of robots along a vertical rough surface using cable movers], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 2019, No. 3 (226), pp. 51-54. EDN ZARJYD.
11. *Daltorio Kathryn and Wei Terence and Horchler Andrew and Southard Lori and Wile Gregory and Quinn Roger and Gorb Stanislav and Ritzmann Roy.* Mini-Whegs TM Climbs Steep Surfaces Using Insect-inspired Attachment Mechanisms, *I. J. Robotic Res.*, 2009, Vol. 28, pp. 285-302.
12. *Daltorio Kathryn & Horchler Andrew & Gorb Stanislav & Ritzmann Roy & Quinn Roger.* A small wall-walking robot with compliant, adhesive feet, 2005, pp. 3648-3653. 10.1109/IROS.2005.1545596.
13. *Syrykh N.V., Chashchukhin V.G.* Roboty vertikal'nogo peremeshcheniya s kontaktnymi ustroystvami na osnove postoyannykh magnitov: konstruksii i printsipy upravleniya kontaktnymi ustroystvami [Vertical movement robots with contact devices based on permanent magnets: designs and principles of contact device control], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control Theory and Systems], 2019, No. 5, pp. 163-173.
14. *Gradetskiy V.G., Knyaz'kov M.M.* Sostoyanie i perspektivy razvitiya robotov vertikal'nogo peremeshcheniya dlya ekstremal'nykh sred [Status and development prospects of vertical movement robots for extreme environments], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2014, No. 1 (2), pp. 9-16.
15. *Serebrennyy V.V., Boshlyakov A.A., Kalinichenko S.V., Ogorodnik A.I., Kononov K.V.* Shagayushchiy robot dlya peremeshcheniya po vertikal'nykh i proizvol'no orientirovannym v prostranstve poverkhnostyam [Walking robot for movement on vertical and arbitrarily oriented in space surfaces], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2021, 22 (11), pp. 585-593.

16. Pobegaylov O.A., Kravchenko I.V., Kozhukhovskiy S.O. Mobil'nye roboty vertikal'nogo peremeshcheniya [Mobile robots of vertical movement], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2010, No. 4 (14), pp. 85-95.
17. Nansai Shunsuke & Mohan Rajesh Elara. A Survey of Wall Climbing Robots: Recent Advances and Challenges, *Robotics*, 2016, 5. 14. 10.3390/robotics5030014.
18. Unver O. & Uneri Ali & Aydemir Alper & Sitti M. Geckobot: A gecko inspired climbing robot using elastomer adhesives, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006, pp. 2329-2335. 10.1109/ROBOT.2006.1642050.
19. Khachatryan A.A., Briskin E.S. O peremeshchenii mobil'nogo robota po proizvol'no orientirovannym poverkhnostyam [On the movement of a mobile robot on arbitrarily oriented surfaces], *Izvestiya VolgGTU* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 2022, No. 9 (268), pp. 86-93.
20. Khachatryan A.A., Smirnaya L.D. Osobennosti dinamiki upravlyаемого dvizheniya robota, oprirayushchegosya na razlichno orientirovannye rovnnye poverkhnosti [Features of the dynamics of controlled motion of a robot resting on differently oriented flat surfaces], *Izvestiya VolgGTU* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 2024, No. 4 (287), pp. 84-87.

Хачатрян Арам Арам – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: Aram-081097@mail.ru; г. Волгоград, Россия; тел.: +79375508766; кафедра «Динамика и прочность машин»; аспирант.

Брискин Евгений Самуилович – e-mail: dtm@vstu.ru; тел.: +78442248113; кафедра «Динамика и прочность машин»; д.ф.-м.н.; профессор.

Khachatryan Aram Aram – Volgograd State Technical University; e-mail: Aram-081097@mail.ru; Volgograd, Russia; phone: +79375508766; the Department of "Dynamics and strength of machines"; postgraduate student.

Briskin Evgeny Samuilovich – e-mail: dtm@vstu.ru; phone: +78442248113; the Department of "Dynamics and strength of machines"; dr. of phys. and math. sc.; professor.

УДК 004.056

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-209-218

С.А. Смирнов, Н.Ю. Паротькин, В.В. Золотарев

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОЖНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Рассматривается вопрос применимости ложных информационных систем и их компонентов в построении автоматизированной системы развертывания прикладной реализации технологии ложных компонентов и управления ею – для совершенствования системы предупреждения атак. Приводятся основные преимущества технологии и роль в стратегии информационной безопасности, задающие специфику и область практического применения ее средств и инструментов. Рассматриваются основы архитектуры и особенности применения технологии, а также ее ограничения. Указываются цель и назначение использования современной технологии в разрезе раскрытия ключевых принципов ее реализации. Кроме того, были проанализированы нормативно-правовые публикации и иные рекомендации, составляющие лучшие практики в области её использования. Рассмотрены концепция и архитектура итогового автоматизированного решения в интеграции в информационные системы и системы защиты, описано функциональное содержание итогового решения. Отличительной особенностью предлагаемого решения является использование управляемых механизмов контейнеризации, обеспечивающих широкие возможности по масштабированию решения и изоляции скомпрометированных компонентов системы в результате действий злоумышленника. Схематически отражается сформулированный процесс практического исполнения системы автоматизации в перспективе подсистем решения и в отношении к зависимым компонентам (предлагаемым документам, внешним средствам и системам) и условиям протекания составляющих операций. Также приводится модель развертывания и функционирования распределенной системы автоматизации в последовательности: настройка сервера развертывания (включая обеспечение), развертывание сети ложных компонентов-ловушек на базе контейнеризации, развертывание внешних приманок, интеграция с внешними относительно композиции решения системами и инстанциями стека информационной безопасности. Принцип реализации решения сводятся к следующему: посредством

средств управления в инфраструктуре информационных технологий размещаются поддельные активы и ресурсы ложной среды, цель которых заключается в том, чтобы попасть под воздействие нарушителя. Развернутый комплекс инструментария подсистем был протестирован при помощи стороннего узла с соответствующим инструментарием и сценариями сканирования. Даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию системы автоматизации развертывания и управления средств и мер технологии ложных компонент.

Информационный обман; технология ложных компонент; ложные компоненты и системы; система автоматизации.

S.A. Smirnov, N.Yu. Parotkin, V.V. Zolotarev

AUTOMATION OF THE USE OF FALSE COMPONENTS IN THE INFORMATION SYSTEM

The article considers the applicability of deceptive information systems and their components in building an automated system for deploying and managing the applied implementation of deceptive component technology to improve the attack prevention system. The main advantages and the role of technology in the information security strategy setting the specifics and the area of technology means and tools practical appliance are suggested. The article considers the fundamentals of the architecture and features of the technology application, as well as its limitations. The purpose and the objective of using the present technology is pointed in terms of key principles of implementation disclosure. In addition, regulatory publications and other recommendations constituting the best practices in the field of its use were analyzed. The concept and architecture of the final automated solution for integration into information systems and security systems are considered, and the functional content of the final solution is described. A distinctive feature of the proposed solution is the use of controlled containerization mechanisms, that provide ample opportunities for scaling the solution and isolating compromised system components as a result of an intruder's actions. A formulated process of the automation system practical implementation in perspective of solution subsystems is schematically described in relation to dependent components (such as suggested document pieces and outer tools and systems) and included operations processing conditions. A model of deployment and operation of a distributed automation system is also provided in the following sequence: setting up a deployment server (including provisioning), deploying a network of false decoy components based on containerization, deploying external baits, integrating with systems and instances of the information security stack external to the composition of the solution. The solution is implemented by means of the principle: fake assets and resources of the fictive environment are deployed in an information technology infrastructure using controls and are intended to be affected by the adversary. The deployed set of subsystem tools was tested using a third-party node with the appropriate tools and scanning scenarios. Recommendations are given for further improvement of the automation system for deployment and management of tools and measures for deceptive component technology.

Cyber deception; deception technology; deceptive systems and components; automation system.

Введение. Исследования показывают [1–4], что со стороны злоумышленника особую обеспокоенность среди различных средств защиты вызывают системы обнаружения вторжений (СОВ) и технология ложных компонент (ТЛК). В сочетании оба типа средств обеспечивают высокую вероятность обнаружение злоумышленника. Тем не менее, перед реализацией ТЛК на практике стоят некоторые концептуальные решения, требующие разрешения для целесообразного использования технологии в составе системы защиты. Так, необходима автоматизация в развертывании и настройке ложной сети (ЛС) компонентов, выступающих в качестве потенциальных целей для злоумышленника, которая дополнительно осложняется тем, что автоматизированному созданию подлежат уникальные сущности – ЛС, требующие комплексной настройки и технологического, информативного обеспечения. Таким образом, сама задача автоматизации создания ЛК выступает конструктивно сложной задачей, требующей многостороннего, интегративного в реализации технологии подхода. Данная необходимость вытекает не только из уникальных технологических мер и ограничений в обеспечении ложного информативного и прикладного пространства, но и – проработке ложного представления для ЛС как для потенциальной и целевой плоскости атаки и его исполнении на этапе планирования развертывания системы для ТЛК.

ТЛК является важнейшим элементом активной защиты и фокусируется на активном обнаружении несанкционированных действий внутри сети, оперативном устранении уязвимостей, сокрытии важной информации и отвлечении злоумышленников от производственных активов. Данная технология позволяет решить актуальные задачи, в том числе в составе СЗИ ГИС (меры ЗИС.27, ЗИС.28) [5]. В частности, можно выделить следующие преимущества ТЛК в составе СОВ [6–8]:

- ◆ существенное затруднение обхода злоумышленником действующей СЗ, препятствование доступа к подлинным активам посредством применения различных тактик и мер, позволяющих запутать атакующего;

- ◆ препятствование сбору подлинной и релевантной для злоумышленника информации об информационной системе (ИС) посредством внедрения ложного слоя потенциальных целей для атаки;

- ◆ минимизация ложных срабатываний, а, следовательно, и дополнительной нагрузки как на центры анализа данных, так и на системы обнаружения атак и мониторинга. Уведомления безопасности со стороны ТЛК считаются точными и к ним приставляется высокий уровень доверия, если технология развернута тактически верно;

- ◆ возможность сбора информации о тактиках, техниках, процедурах злоумышленника в ходе реализации им атаки – без рисков для защищаемых активов. На основе полученных сведений, СЗ может быть модифицирована соответствующими превентивными мерами защиты.

Автоматизированная ТЛК в составе СОВ позволяет обеспечить раннее обнаружение атак, дополняя систему возможностью обнаружения даже тех действий, что не были предотвращены действующей СЗ, что связано со спецификой концепции и принципами работы технологии.

1. Основы работы технологии ложных компонент. Как следует из названия технологии, ее основное назначение заключается в привлечении злоумышленника и его автоматизированных инструментов атаки таким образом, чтобы ими был осуществлен доступ к ложным информационным активам и ресурсам. Также ТЛК может быть развернута с целью сокрытия подлинных активов. Так, основное внимание при интеграции решения ТЛК фокусируется на управлении доступом и перенаправлении трафика, различных средствах маскирования подлинной информации [9, 12].

Аспект информационного обмана (ИО) в ТЛК строится на построении внешнего представления посредством манипулирования доступной информацией, сочетании подлинных и ложных данных [10, 11].

Реализация ТЛК предполагает взаимодополняющие основные аспекты, посредством которых и реализуется инфраструктура обмана:

- ◆ сокрытие подлинной ИС, ее ресурсов и активов;
- ◆ моделирование ложной ИС.

Принципы работы технологии сводятся к следующему: посредством централизованных средств управления в инфраструктуре информационных технологий (ИТИ) развешиваются ловушки и размещаются приманки – поддельные активы и ресурсы построения ложной среды, цель которых заключается в том, чтобы попасть под воздействие нарушителя. Открытие файла приманки или использование поддельного пароля приводит к генерации уведомления безопасности и процессу идентификации злоумышленника. Ввиду изоляции ложных компонентов от производственных систем, попытки доступа к ловушкам указывают на факт вторжения злоумышленника и осуществления им несанкционированных действий, которые задействуют отправку оповещений безопасности и регистрацию действий в ЛК [13].

Тем не менее, средства ИО ТЛК могут быть размещены и в среде подлинной ИТИ [14, 15]. К подобным ЛК относятся *Honeytoken* и *Canarytoken*, способствующие обнаружению внутреннего нарушителя ИБ. Для того, чтобы приманки характеризовались правдоподобностью с точки зрения злоумышленника, могут использоваться навигационные компоненты – фрагменты информации, помещаемые в реальные активы, ведущие злоумышленника в реализуемой атаке непосредственно к ложным целям [16, 17].

Говоря об изоляции поддельного слоя информационной инфраструктуры от слоя подлинной инфраструктуры, следует отметить, что ложные объекты остаются неизвестны легитимным субъектам, что обеспечивается различными методами, например, сегментацией сети [18].

В настоящее время ТЛК представлена решениями – СЗИ класса *DDP (Distributed Deception Platform)* и *TDP (Threat Deception Platform)*, ориентированное в большей степени на активную ликвидацию угроз и уязвимостей [19]. Подобные решения представляют собой системы управления распределенными ложными целями – сетевыми объектами, управляемыми централизованно при помощи сервера (и модуля управления) [20].

Модуль управления связывается с сервером развертывания ЛС таким образом, чтобы посредством получаемых команд осуществлять любые предусмотренные действия управления в отношении составляющих сеть ЛК. Непосредственные компоненты обеспечиваются средствами для регистрации действий, сбора и хранения получаемых данных, а также реагирования, либо включенных в состав соответствующих модулей на стороне сервера или центра управления – в зависимости от применяемой модели централизованного управления ЛК как целостной системой. ЛК – ловушки и эмулируемые сервисы соединены с сервером на постоянной основе, исключая при этом факт легитимного обращения к ним (т.е. вне предусмотренной в решении модели взаимодействия компонентов как правдоподобной сети) [20].

Современные решения технологии широко используют интеллектуальные подходы к формированию данных и приманок (в том числе, с применением ИИ), распознаванию атак, сбору и анализу ВПО, имитации правдоподобной активности в ложной инфраструктуре распределенных целей – и для многих других задач.

Отдельным вопросом при рассмотрении решений класса выступает возможность мониторинга состояния компонентов и ЛС в целом, который может быть разрешен как с использованием агентурной системы, так и без нее; при этом каждый метод связан с соответствующими издержками в реализации итоговой модели функционирования решения.

2. Система автоматизации создания ложных целей в рамках технологии ложных компонентов. Одной из актуальных задач, стоящих перед ТЛК, выступает автоматизация создания и настройки разнотипных ЛК, поскольку ручное оперирование процессами связано с существенными издержками; проблематика обусловлена сущностью технологии, предполагающей эмуляцию достоверной, многообразной по своему содержанию ИТИ, в своей вариативности обладающему чертами индивидуальности, аутентичности для каждой отдельной ИС.

Определим методы автоматизации процессов развертывания ЛС. В качестве отдельных групп управляемых процессов в существе развертывания инфраструктуры ЛК можно выделить следующие:

- ◆ создание типовых контейнерных ЛК в масштабируемом количестве и централизованная настройка ложной сети;
- ◆ генерация, распространение, размещение в ЛС компонентов-приманок (файлов) – ложных данных;
- ◆ конфигурирование контейнерных ЛК-ловушек как отдельных уникальных, либо типовых единиц;
- ◆ развертывание и настройка служб, сервисов и протоколов ИТИ для формирования уникального содержания представления высокоуровневых ЛК;
- ◆ настройка и обеспечение функционирования входящих в состав решения средств, инструментов, тиражируемых по ложным средам для регистрации действий злоумышленника и в других целях, стоящих перед решением.

Управление созданием распределенной ЛС целей можно, таким образом, разделить на логические этапы:

1) начальный: развертывание и настройка средств сервера централизованного управления компонентами решения, а также обеспечение связей интеграции с другими СЗИ и модулями управления. Также на данном этапе определяются параметры сети ложной инфраструктуры, ее топология;

2) настройка и создание эталонных компонентов, используемых как типовой основой для дальнейшей реализации ИО, обладающих некоторой базовой конфигурацией и необходимым набором средств решения вне ИО;

3) автоматизированная генерация и распространение независимых уникальных экземпляров приманок для наполнения интерактивных ЛК сети. Поскольку соответствие отдельного экземпляра ложных данных и конкретной системы (ловушки) не требуется, данный процесс может протекать изолированно от прочих целенаправленных операций с ловушками;

4) конфигурирование отдельных ЛК и развертывание служб, сервисов и приложений в целях ИО.

Рассмотрим модули решения. Были выделены следующие сущности:

- ◆ сервер развертывания: виртуальная или реальная система, обеспечивающая технологические действия с распределенными ложными целями;
- ◆ центр управления: функционал управления может быть локализован как на непосредственном сервере, так и вынесен на удаленные системы;
- ◆ модуль анализа: вынесен на внешнюю систему *SIEM*;
- ◆ модуль обнаружения вторжений и регистрации: исполняется разнородными средствами, обеспечивающими создание ЛК;
- ◆ модуль передачи данных: настроенное взаимодействие сервера и клиента для передачи журналов событий.

Далее представлена модель (схема) функционирования решения в рамках системы автоматизации создания ложных целей посредством ЛС решения (рис. 1). Цветом выделены процессы, внешние относительно исполняемой в исследовании системы решения и рекомендованные для использования в составе обеспечивающего его комплекса. Модель иллюстрирует реализованные аспекты автоматизации в управлении решением и затрагивают не только процесс создания ЛС, но и – внесение, удаление отдельных ЛК, уничтожение ЛС; данная совокупность автоматизируемых операций названа масштабированием. В основе модели лежит разделение на описанные подсистемы решения.

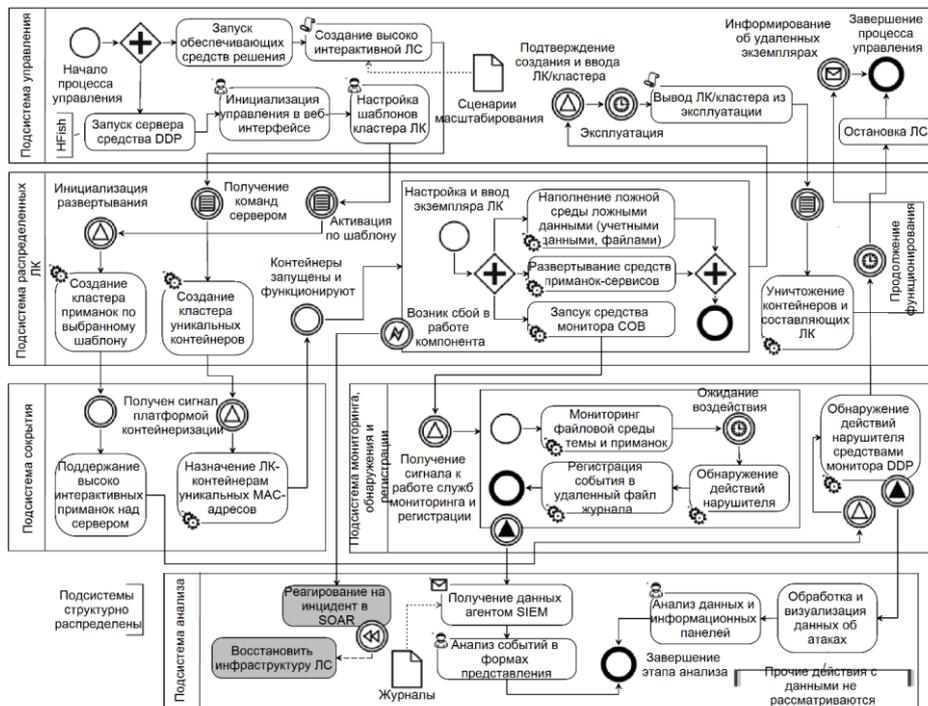


Рис. 1. Схема исполнения решения в системе автоматизации (BPMN 2.0)

При этом, для определяемой системы характерна модель информационных потоков (рис. 2). Данная модель иллюстрирует роли интеграций компонентов, реализующих ИО, с внешними обеспечивающими системами и демонстрирует общую сложность системы автоматизации. Произведено разделение на внешние сущности, процессы (операции) и экземпляры хранения данных – связанные каналами передачи данных и управления.



Рис. 2. Схема информационных потоков в рамках системы решения (DFD)

Как видно по схемам выше, потоки сосредоточены на нескольких категориях (передачи) данных: иницирующие активности и операции воздействия, данные событий действий нарушителя и данные для мониторинга.

Схема развертывания системы решения, включая необходимые предполагаемые интеграции с соответствующими средствами и системами (защиты), представлена на рис. 3.

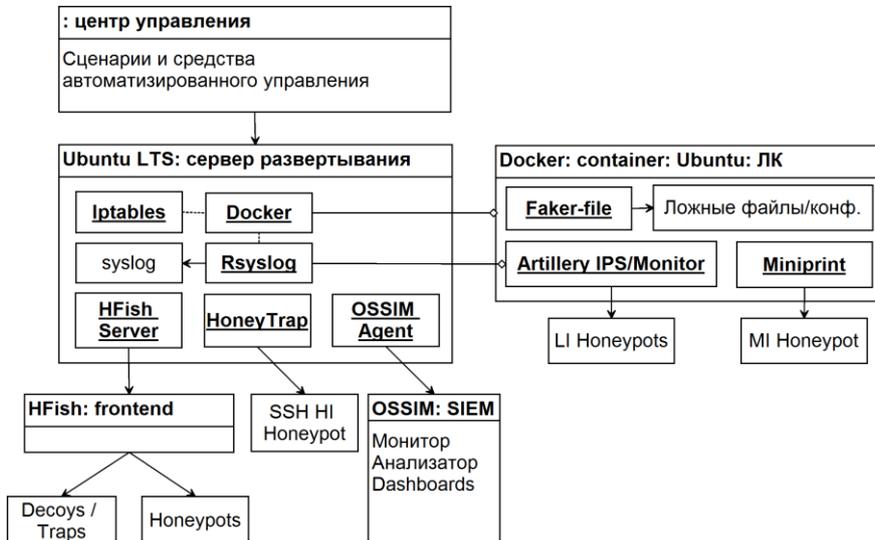


Рис. 3. Схема развертывания системы решения (UML Deployment)

Первым шагом были протестированы возможности *Honey Trap*. Было произведено подключение к узлу по *ssh*. При этом осуществлялось перенаправление в ложную среду. Следующим шагом производилось сканирование эмулируемого устройства *Miniprint*. При попытке сканирования сервер также отзывался соответствующими уведомлениями. Далее производилось сканирование приманок, развернутых средствами *Artillery*. До запуска сервера сетевое представление ЛК-контейнера содержит только фильтруемый порт

передачи *Syslog*. После запуска сервера произведем простое сканирование *Nmap* портов и сетевых служб, а также сканирование уязвимостей, результатом которого стало обнаружение 15 новых служб.

Далее произведем сканирование приманок платформы *HFish* и сопоставим результаты. На рисунке 4 продемонстрировано сканирование адреса сервера развертывания, на котором функционируют приманки платформы, средствами *Nmap* с использованием сценария выявления уязвимостей *Vulscan*.

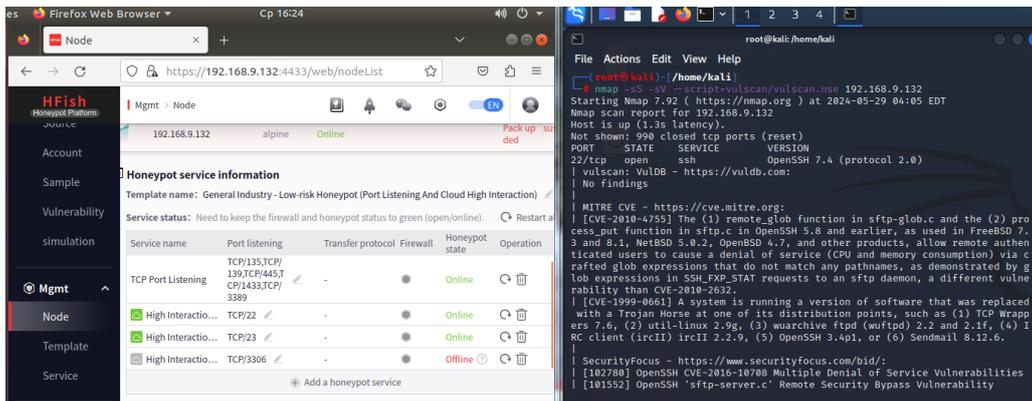


Рис. 4. Сканирование *HFish* с использованием сценария *.NSE (Nmap)*

Таким образом было произведено взаимодействие различных уровней интерактивности внешней стороны (нарушителя) с сетевым представлением, сформированным комплексом ложных компонентов. В результате отмечена работоспособность всех развернутых компонентов, паттерны применения мер ИО со стороны не выявлены.

Описанными средствами также достигается некоторое сокрытие сервера: *ssh*-трафик перенаправляется в ложную среду, тогда как результаты сканирования предоставляют информацию злоумышленнику, формируя недостоверную картину сетевого представления узла – тогда как сам сервер защищен межсетевым экраном и СОВ.

Заключение. По результатам исследования была разработана комплексная система автоматизации создания ложных целей в рамках уникального многокомпонентного решения технологии в составе системы предупреждения вторжений. Так, было произведено решение основных стоявших в рамках исследования проблем использования технологии, сформулирована и протестирована возможность построения системы автоматизации, распределенной в решении, построенного в соответствии с принципами *DevOps* и модульным подходом. Система решения не представляет собой итоговую и полностью обеспеченную модель для отдельных специфических информационных систем, но демонстрирует логику и возможность использования автоматизированных и осуществимых подходов в масштабировании средств технологии ложных компонентов, их интеграции в систему защиты и практического использования мер информационного обмана.

Тем не менее, в дальнейшем, в зависимости от реализуемого функционала, рекомендуется интеграция комплекса решения с *SOAR*. Помимо этого, на основании результатов исследования данной главы рекомендуется построение системы эмуляции ложной активности – и прочие продвинутое техники и методы информационного обмана ТЛК, обеспечивающие привлекательность ложных целей. Подобные аспекты не были затронуты в рамках исследования, поскольку выходят за границы изначальной цели в образовании системы автоматизации непосредственного создания ложных целей – а не обеспечения их уникальной сущности функционирования в перспективе. Так, работа затрагивает именно первоначальный этап автоматизированного развертывания средств и мер ТЛК и построения необходимых для дальнейших процессов управления связей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Crandall C., Salazar J.* Deception-Based Threat Detection: Shifting power to the defenders. – Attivo Networks, inc: 2019. – vi, 116 p. – URL: <https://www.bankinfosecurity.com/whitepapers/deception-based-threat-detection-shifting-power-to-defenders-w-5780> (дата обращения: 07.01.2024).
2. ITRC: 2023 Data Breach Report / Identity Theft Resource Center: 2024. – 40 p. – URL: <https://www.idtheftcenter.org/publication/2023-data-breach-report/> (дата обращения: 13.03.2024).
3. SCALE: Cybersecurity Perspectives 2023 / SCALE. – 20 p. – URL: <https://www.scalevp.com/wp-content/uploads/2023/10/Scale-Security-Report-2023-Final.pdf> (дата обращения: 14.03.2024).
4. Attivo Networks: Defending Against Insider Threats with Attivo Networks: whitepaper / Attivo Networks, 2019. – 5 p. – URL: <https://www.bankinfosecurity.com/whitepapers/defending-against-insider-threats-attivo-networks-w-5784> (дата обращения: 14.03.2024).
5. Методический документ. Меры защиты информации в государственных информационных системах: методический документ ФСТЭК: издание официальное: утвержден 11 февраля 2014 г.: введены впервые: дата введения 2014-02-11. – М.: ЗАО «Кодекс», 2014. – 128 с.
6. *Bellekens X.* How Does Cyber Deception Work and Why Should you Care? – URL: <https://www.lupovis.io/how-does-cyber-deception-work/> (дата обращения: 07.01.2024).
7. *Strand J., Asadoorian P. [u др.]*. Offensive Counter-measures: The Art of Active Defense. – Self-published. – 2017. – 167 p. – ISBN: 1974671690.
8. *Lachow I.* Active Cyber Defense: A framework for Policymakers. – Vol. 2022. – Article ID 3949292. – 17 p. – URL: <https://www.cnas.org/publications/reports/active-cyber-defense-a-framework-for-policymakers> (дата обращения: 15.03.2024).
9. *Srinivasa S., Pedersen M. [u др.]*. Gotta catch 'em all: A Multistage Framework for Honeypot fingerprinting. – 26 p. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/354776911> (дата обращения: 15.03.2024).
10. *Cohen E.* DECEPTION: TYPES, PRINCIPLES, AND TACTICS // IS: The International Journal of an Emerging Transdiscipline. – 2019. – Vol. 22. – P. 137-156. – DOI: 10.28945/4487. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/344634437> (дата обращения: 19.01.2024).
11. *Wang C., Lu Z.* IEEE Security Cyber Deception Overview and The Road Ahead // IEEE Security and Privacy Magazine. – IEEE, 2018. – 16 (2). – P. 80-85. – DOI: 10.1109/MSP.2018.1870866. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/324117795> (дата обращения: 17.01.2024).
12. *Путято М.М., Макарян А.С. [u др.]*. Исследование применения технологии deception для предотвращения угроз кибербезопасности // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 4 (52). – DOI: 10.21672/2074-1707.2020.52.4.085-098. – 14 p. – URL: <https://hit-tech.asu.edu.ru/?articleId=1260> (дата обращения: 16.03.2024).
13. Advanced Threat Protection: Threat Detection and Threat Prevention: Tools and Tech. – URL: <https://www.cynet.com/advanced-threat-protection/threat-detection-and-threat-prevention-tools-and-tech/> (дата обращения: 29.03.2022).
14. *Li Zhang., Thing L.* Three Decades of Deception Techniques in Active Cyber Defense – Retrospect and Outlook. – 19 p. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/350750138> (дата обращения: 16.04.2024).
15. *Islam M.M., Al-Shaer E.* Active Deception Framework: An Extensible Development Environment for Adaptive Cyber Deception // 2020 IEEE Secure Development (SecDev). – Conference: IEEE 28-30 September 2020. – P. 41-48. – DOI: 10.1109/SecDev45635.2020.00023. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9230100> (дата обращения: 26.04.2024).
16. *Heckman K.E., Stech F.J. [u др.]*. Denial and Deception in Cyber Defense. The MITRE Corporation // IEEE. – Computer. – 2015. – Vol. 48, Issue 4. – P. 36-44. – DOI: 10.1109/MC.2015.104. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7085646> (дата обращения: 30.04.2024).
17. *Mizrahi R.* Deploying Deception in the Enterprise Network. – URL: <https://www.darkreading.com/attacks-breaches/deploying-deception-in-the-enterprise-network> (дата обращения: 30.03.2022).
18. *Bowcut S.* Decoys, Deception Sensors, and Breadcrumb Data – What's a Hacker To Do? – URL: <https://brilliancecuritymagazine.com/cybersecurity/decoys-deception-sensors-and-breadcrumb-data-whats-a-hacker-to-do/> (дата обращения: 11.04.2022).
19. R-Vision Threat Deception Platform. – Имитация ИТ-инфраструктуры для обнаружения кибератак / R-Vision. – 4 p. – URL: <https://rvision.ru/storage/2022/04/07/hN63FoYRijfyBKiyGx3Dytc1QhrZkIagh0K9WYbr.pdf> (дата обращения: 10.04.2022).
20. *Бортников С.* Использование ловушек (Deception) для обнаружения злоумышленников в инфраструктуре. – URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/Intruder-Detection-Using-Deception (дата обращения: 09.05.2024).

REFERENCES

1. *Crandall C., Salazar J.* Deception-Based Threat Deception: Shifting power to the defenders. Attivo Networks, inc: 2019, vi, 116 p. Available at: <https://www.bankinfosecurity.com/whitepapers/deception-based-threat-detection-shifting-power-to-defenders-w-5780> (accessed 07 January 2024).
2. ITRC: 2023 Data Breach Report Identity Theft Resource Center: 2024 40 p. Available at: <https://www.idtheftcenter.org/publication/2023-data-breach-report/> (accessed 13 March 2024).
3. SCALE: Cybersecurity Perspectives 2023, SCALE, 20 p. Available at: <https://www.scalevp.com/wp-content/uploads/2023/10/Scale-Security-Report-2023-Final.pdf> (accessed 14 March 2024).
4. Attivo Networks: Defending Against Insider Threats with Attivo Networks: whitepaper, Attivo Networks, 2019, 5 p. Available at: <https://www.bankinfosecurity.com/whitepapers/defending-against-insider-threats-attivo-networks-w-5784> (accessed 14 March 2024).
5. Metodicheskiy dokument. Mery zashchity informatsii v gosudarstvennykh informatsionnykh sistemakh: metodicheskiy dokument FSTEC [Methodological document. Information security measures in state information systems: FSTEC methodological document]: official publication: approved on February 11, 2014: introduced for the first time: date of introduction 2014-02-11. Moscow: ZAO «Kodeks», 2014, 128 p.
6. *Bellekens X.* How Does Cyber Deception Work and Why Should you Care? Available at: <https://www.lupovis.io/how-does-cyber-deception-work/> (accessed 07 January 2024).
7. *Strand J., Asadoorian P.* [u òp.]. Offensive Counter-measures: The Art of Active Defense. Self-published, 2017, 167 p. ISBN: 1974671690.
8. *Lachow I.* Active Cyber Defense: A framework for Policymakers, Vol. 2022, Article ID 3949292, 17 p. Available at: <https://www.cnas.org/publications/reports/active-cyber-defense-a-framework-for-policymakers> (accessed 15 March 2024).
9. *Srinivasa S., Pedersen M.* [u òp.]. Gotta catch' em all: A Multistage Framework for Honeypot fingerprinting, 26 p. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/354776911> (accessed 15 March 2024).
10. *Cohen E.* DECEPTION: TYPES, PRINCIPLES, AND TACTICS, *IS: The International Journal of an Emerging Transdiscipline*, 2019, Vol. 22, pp. 137-156. DOI: 10.28945/4487. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/344634437> (accessed 19 January 2024).
11. *Wang C., Lu Z.* IEEE Security Cyber Deception Overview and The Road Ahead, *IEEE Security and Privacy Magazine*. IEEE, 2018, 16 (2), pp. 80-85. DOI: 10.1109/MSP.2018.1870866. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/324117795> (accessed 17 January 2024).
12. *Putyato M.M., Makaryan A.S.* [i dr.]. Issledovanie primeneniya tekhnologii deception dlya predotvrashcheniya ugroz kiberneticheskoy bezopasnosti [Study of the application of deception technology to prevent cybersecurity threats], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2020, No. 4 (52). DOI: 10.21672/2074-1707.2020.52.4.085-098, 14 p. Available at: <https://hi-tech.asu.edu.ru/?articleId=1260> (accessed 16 March 2024).
13. Advanced Threat Protection: Threat Detection and Threat Prevention: Tools and Tech. Available at: <https://www.cynet.com/advanced-threat-protection/threat-detection-and-threat-prevention-tools-and-tech/> (accessed 29 March 2024).
14. *Li Zhang., Thing L.* Three Decades of Deception Techniques in Active Cyber Defense – Retrospect and Outlook 19 p. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/350750138> (accessed 16 April 2024).
15. *Islam M.M., Al-Shaer E.* Active Deception Framework: An Extensible Development Environment for Adaptive Cyber Deception, 2020 *IEEE Secure Development (SecDev). Conference: IEEE 28-30 September 2020*, pp. 41-48. DOI: 10.1109/SecDev45635.2020.00023. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9230100> (accessed 26 April 2024).
16. *Heckman K.E., Stech F.J.* [u òp.]. Denial and Deception in Cyber Defense. The MITRE Corporation, *IEEE. Computer*, 2015, Vol. 48, Issue 4, pp. 36-44. DOI: 10.1109/MC.2015.104. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7085646> (accessed 30 April 2024).
17. *Mizrahi R.* Deploying Deception in the Enterprise Network. Available at: <https://www.darkreading.com/attacks-breaches/deploying-deception-in-the-enterprise-network> (accessed 30 March 2022).
18. *Bowcut S.* Decoys, Deception Sensors, and Breadcrumb Data – What's a Hacker To Do? Available at: <https://brilliancecuritymagazine.com/cybersecurity/decoys-deception-sensors-and-breadcrumb-data-whats-a-hacker-to-do/> (accessed 11 April 2022).
19. R-Vision Threat Deception Platform. – Имитация ИТ-инфраструктуры для обнаружения кибератак / R-Vision. – 4 p. Available at: <https://rvision.ru/storage/2022/04/07/hN63FoYRijfyBKiyGx3Dytc1QhrZklagh0K9WYybr.pdf> (accessed 10 April 2022).
20. *Bortnikov S.* Ispol'zovanie lovshek (Deception) dlya obnaruzheniya zloumyshlennikov v infrastrukture [Using traps (Deception) to detect intruders in the infrastructure]. Available at: https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/Intruder-Detection-Using-Deception (accessed 09 May 2024).

Смирнов Семен Александрович – Сибирский университет науки и технологий; e-mail: simon.simrirel@gmail.com; г. Красноярск, Россия; тел.: 89130407272; кафедра безопасности информационных технологий; аспирант.

Паротькин Николай Юрьевич – e-mail: nyparotkin@yandex.ru; тел.: 89509920640; кафедра безопасности информационных технологий; к.т.н; доцент.

Золотарев Вячеслав Владимирович – e-mail: zolotorev@sibsau.ru; тел.: 89059738091; кафедра безопасности информационных технологий; зав. кафедрой; к.т.н.

Smirnov Simon Aleksandrovich – Siberian University of Science and Technology; e-mail: simon.simrirel@gmail.com; Krasnoyarsk, Russia; phone: +79130407272; the Department of Information Technology Security; post graduate student.

Parotkin Nikolay Yuryevich – e-mail: nyparotkin@yandex.ru; phone: +79509920640; the Department of Information Technology Security; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zolotarev Vyacheslav Vladimirovich – e-mail: zolotorev@sibsau.ru; phone: +79059738091; the Department of Information Technology Security; head of department; cand. of eng. sc.

УДК 004.056

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-218-229

В.Г. Жуков, С.В. Селигеев

ГОСУДАРСТВЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ИМЕНОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ УПРАВЛЕНИЯ УЯЗВИМОСТЯМИ

Управление ИТ активами является базисом для построения эффективного процесса управления уязвимостями. Не имея представления о контролируемых ИТ активах, технически невозможно начать построение процесса управления уязвимостями. При наличии действующего процесса управления ИТ активами, одной из задач, являющейся важной для управления уязвимостями, является однозначное именование программного обеспечения как актива. Такое однозначное именование позволяет идентифицировать программное обеспечение и его уязвимости без применения активного сканирования узлов ИТ инфраструктуры, а только при помощи взаимодействия с системой управления ИТ активами. Технически данный подход можно назвать «пассивное обнаружение уязвимостей», однако использование существующих систем именования для его реализации является крайне трудоемкой задачей. Для того чтобы сделать пассивное обнаружение реальным, в работе авторами предлагается создать общий фундамент путем формирования концептуальной схемы и последующего создания системы стандартизированного именования и идентификации программного обеспечения, регулирование которой будет происходить централизованно на государственном уровне. В рамках рассмотрения существующих систем именования программного обеспечения, внимание уделяется проблемам СРЕ как со стороны специалистов на местах, а именно получение СРЕ-идентификаторов и трансляция информации о программном обеспечении в СРЕ-идентификатор, так и со стороны агрегатора данных об уязвимостях, а именно получение сведений об уязвимостях через СРЕ-идентификатор. Обнаруженные в ходе исследования проблемы применения СРЕ, а также проблемы взаимодействия с агрегаторами данных об уязвимостях из недружественных стран формируют предпосылки к формированию национальной системы государственного регулирования именования и идентификации программного обеспечения, которая устраним проблемы существующих систем именования программного обеспечения. В заключении приводятся преимущества национальной системы именования и идентификации программного обеспечения в случае ее создания и использования в реальных условиях всеми участниками процесса управления уязвимостями.

Информационная безопасность; управление уязвимостями; управление активами; СРЕ.

V.G. Zhukov, S.V. Seligeev

STATE REGULATION OF NAMING AND SOFTWARE IDENTIFICATION IN VULNERABILITY MANAGEMENT PROCESSES

IT asset management is the foundation for building an effective vulnerability management process. Without an understanding of the IT assets under control, it is technically impossible to start building a vulnerability management process. With an existing IT asset management process in place, one of the tasks that is essential to vulnerability management is to uniquely name software as an asset. This unambiguous naming allows the software and its vulnerabilities to be identified without actively scanning IT infrastructure nodes, but only by interacting with the IT asset management system. Technically, this approach can be called “passive vulnerability detection,” but it is extremely labor-intensive to implement using existing naming systems. In order to make the possibility of passive detection more realistic, the authors propose to create a common foundation by forming a conceptual scheme and then creating a system of standardized naming and identification of software, the regulation of which will be centralized at the state level. As part of the review of existing software naming systems, attention is paid to CPE problems both on the part of on-site specialists, namely obtaining CPE identifiers and translating software information into a CPE identifier, and on the part of a vulnerability data aggregator, namely obtaining vulnerability information via a CPE identifier. The problems of CPE application, as well as the problems of interaction with vulnerability data aggregators from unfriendly countries, discovered in the course of the research form the prerequisites for the formation of a national system for state regulation of software naming and identification, which will eliminate the problems of existing software naming systems. In conclusion, advantages of the national system of software naming and identification are given in case of its creation and use in real conditions by all participants of the vulnerability management process.

Information security; vulnerability management; asset management; CPE.

Введение. В рамках организации работ по управлению уязвимостями программных и программно-аппаратных средств в целевой ИТ инфраструктуре в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов, методических документов [1] и лучших практик [2] необходимо изначально идентифицировать ИТ активы, которые необходимо контролировать. Данное мероприятие по идентификации должно носить не ручной разовый характер, а иметь системное решение с применением специализированного программного обеспечения – системы управления ИТ активами. Система управления ИТ активами должна предоставлять не только информацию о физических и виртуальных узлах защищаемой ИТ инфраструктуры, но и актуальные детализированные сведения об установленном на этих узлах системном и прикладном программном обеспечении. Сам факт существования и оперативный доступ к актуальной непротиворечивой детальной информации об ИТ активах имеет ценность в контексте реализации эффективного процесса управления уязвимостями и в обеспечении информационной безопасности в целом. Так, например, потенциально существует возможность быстро обнаруживать некоторые уязвимости основываясь только лишь на информации из системы управления ИТ активами, без непосредственного сканирования самих целевых узлов ИТ инфраструктуры, и, как следствие, без создания вычислительной нагрузки на эти узлы и вычислительную сеть для осуществления удаленной коммуникации с ними.

Необходимым условием пассивного обнаружения уязвимостей является гарантия однозначной идентификации установленного программного обеспечения через уникальный стандартизированный идентификатор программного обеспечения, который хранится как в описании самой уязвимости, так и в системе управления ИТ активами. В качестве примера подобной системы именованя и идентификации активов можно привести Common Platform Enumeration (CPE) и другие частные решения, которые есть у каждого производителя решений класса Vulnerability Management (VM) и других средств защиты информации. Качество решения задачи именованя и идентификации программного обеспечения [3–6] определяет скорость и точность обнаружения уязвимостей, требуемые для этого вычислительные ресурсы. Отдельно стоит обратить внимание на проблему большого количества обнаруживаемых уязвимостей, так, например, рост количества об-

наруживаемых уязвимостей [7] и переход National Vulnerability Database (NVD) на новый формат данных CVE – JSON – привел к значительным задержкам в обработке уязвимостей [8] при их регистрации, из-за которых на момент мая 2024 года была обработана лишь 1/3 уведомлений об уязвимостях, полученных за начало года, т.е. 2/3 обнаруженных уязвимостей находятся в очереди на регистрацию и не имеют идентификатора уязвимости, связанного с уязвимым программным обеспечением. При этом, с учетом растущего ландшафта угроз [9], злоумышленники активно эксплуатируют некоторые из этих уязвимостей. Частично данная проблема может быть решена дорогостоящими средствами защиты информации, производители которых самостоятельно обеспечивают высокое качество экспертизы уязвимостей и автоматизацию их обнаружения в целевой ИТ инфраструктуре, но не все организации могут позволить себе их приобретение. Пассивное обнаружение уязвимостей через однозначную идентификацию установленного программного обеспечения позволит значительно уменьшить расходы и повысить оперативность обнаружения, снизит потребность в частоте и объеме активного обнаружения (сканирования), и, в целом, приведет к повышению эффективности процесса управления уязвимостями.

Таким образом, постоянное совершенствование существующих и создание новых решений задачи именованья и идентификации программного обеспечения является актуальной научно-технической проблемой и требует проведения исследований и разработки системного решения для всех участников процесса управления уязвимостями.

В работе авторы рассматривают теоретические и практические аспекты применения существующих систем однозначного именованья и идентификации программного обеспечения, а также существующие проблемы их применения. На основании анализа проблем вводится предложение о необходимости разработки национальной системы для государственного (обязательного и централизованного) регулирования именованья и идентификации программного обеспечения, как минимум, в управлении уязвимостями. В качестве основы для системы предполагается использовать уже существующие Реестр российского программного обеспечения [10] и банк данных угроз ФСТЭК [11], как национальный агрегатор данных об уязвимостях программных и программно-аппаратных средств.

1. Существующие подходы и проблемы их применения. Гипотеза о возможности применения систем именованья и идентификации программного обеспечения для проведения пассивного анализа (без непосредственного сканирования) на предмет наличия уязвимостей программного обеспечения рассматривалась ранее авторами в работе [12]. Наиболее перспективными для применения в рамках решаемой задачи, по мнению авторов, являются такие системы как: software identification (SWID), package URL (PURL), Common Platform Enumeration (CPE).

SWID состоит из структурированного набора элементов данных (формат XML), которые идентифицируют конкретное программное обеспечение, характеризуют его версию, определяют организации и отдельные лица, которые сыграли роль в его разработке и распространении, перечисляют используемые зависимости, устанавливают отношения между различным программным обеспечением, и предоставляют другие метаданные. Данная система является частью спецификации Security Content Automation Protocol (SCAP), что дает совместимость с Common Vulnerabilities and Exposures (CVE).

Сложность, применяя данной системы заключается в том, что на ее основе строится отдельный процесс управления программным обеспечением, основанным на установке SWID меток в соответствии со стандартом ISO/IEC 19770-2:2015. Данная метка устанавливается на конечном этапе процесса установки программного обеспечения. В рамках данной системы однозначное именованье программного обеспечения является только частной задачей, а не основной целью, что делает ее не актуальной для рассмотрения в рамках данной работы. Так же необходимо учитывать тот факт, что в рамках организаций на территории Российской Федерации система не получила широкого применения.

Package URL (PURL) – это попытка стандартизировать существующие подходы к идентификации пакетов программного обеспечения. Особенность данного стандарта заключается в том, что помимо метаданных о пакете, описание содержит действительный адрес, по которому данный пакет можно получить. Запись идентификатора, согласно этому стандарту, представляет собой строку, оформленную в соответствии с заданным шаблоном, каждый элемент которого отражает конкретное значение.

PURL в сравнении с ранее упомянутым SWID, основной целью которого является однозначное именование программного обеспечения, является более релевантным в контексте пассивного анализа на наличие уязвимостей. Так же тот факт, что система направлена на именование программного обеспечения для Unix-подобных систем, делает ее актуальной в связи с массовым импортозамещением операционных систем на отечественные аналоги, такие как Astra Linux, РЭД ОС, ОС Альт.

Вышеописанные достоинства PURL перекрываются тем фактом, что записи в формате Package URL не совместимы с существующей системой правил описания уязвимостей CVE и отечественными ГОСТами: ГОСТ Р 56545-2015 и ГОСТ Р 56546-2015, т.е. для применения этой системы необходима интерпретация (преобразование, отображение) идентификатора PURL в формат, применяемый в рамках существующей системы описания уязвимостей – это делает систему такой же не применимой на данный момент времени, как и вышеописанный SWID.

CPE так же, как и SWID является частью спецификации SCAP и на данный момент применяется в рамках отечественных процессов управления уязвимостями. Основная идея этой системы заключается в том, что данные имена интегрируются в CVE, для описания конкретного программного обеспечения, которое подвержено уязвимости, а также его версии и установленных обновлений. Фактически имя (идентификатор) по CPE представляет из себя строку с разделителями, где каждое значение описывает отдельный атрибут программного обеспечения.

Запись CPE формируется (или выбирается) в момент регистрации CVE уязвимости, и в последствии попадает в словарь CPE, который доступен как в виде файла (периодически обновляемого), так и посредством API, что расширяет возможные границы применения данной системы именования.

NVD как и другие агрегаторы данных об уязвимостях, например CISA Known Exploited Vulnerabilities (KEV) Catalog является сервисом, но в связи с геополитической обстановкой в мире крайне высок шанс того, что сервисы, чья работа обеспечивается недружественными странами, либо будут заблокированы, либо прекратят предоставлять услуги организациям с территории Российской Федерации. Ярким примером подобных действий является кратковременное прекращение обслуживания сервисом Docker Hub Российской Федерации и ряда других стран. NIST, и, в частности, NVD подчинены недружественному государству, что так же увеличивает вероятность ограничения обслуживания. Более серьезной проблемой является предоставление этими сервисами неполной или заведомо ложной информации организациям из нашей страны или стран-союзников в деструктивных целях – саботаж работы сканеров безопасности/уязвимостей/анализа защищенности и систем класса VM, кибердиверсии.

Вышеописанная проблема является основной, но не единственной предпосылкой к созданию национальной системы для государственного регулирования именования и идентификации программного обеспечения, с целью обеспечения независимости от внешних источников. Второй и не менее важной предпосылкой являются проблемы практического применения данной системы в рамках процессов управления уязвимостями, что более подробно рассматривается в следующем разделе.

2. Анализ практической применимости CPE. Для начала стоит отразить основную идею применения CPE-идентификаторов, которая ранее рассматривалась исследователями в работе [12]. Каждый идентификатор CVE, будь то в NVD или других базах данных сканеров безопасности, содержит в себе, помимо описания основных свойств уязвимости и оценки ее опасности, CPE-идентификатор который отражает подверженное уязвимости конкретное программное обеспечение с указанием его версии. При наличии в системе управления ИТ активами описания программного обеспечения в виде CPE-идентификатора открывается возможность обнаружения уязвимых активов с использованием лишь данных из системы управления ИТ активами, то есть без непосредственного сканирования. Такое обнаружение, в отличие от активного [13], может значительно снизить ресурсы и время, затраченное на идентификацию уязвимых активов в ИТ инфраструктуре, что увеличит эффективность процесса управления уязвимостями.

Ранее, в [12] авторами уже описывались проблемы неполных CVE-идентификаторов и ограниченности CVE-словаря в следствии того, что записи в нем появляются в массе своей только в момент регистрации уязвимостей в NVD. Фактически записей для программного обеспечения, в котором на данный момент не обнаружены уязвимости нет, либо в описании уязвимости используется обобщённый (неполный) CVE-идентификатор, что ограничивает появление новых CVE-идентификаторов. Далее рассматривается применимость CVE с учетом использования реальных инструментов с целью практического выявления проблем отличных от вышеописанных.

В рамках проводимого авторами исследования в качестве системы управления ИТ активами использовался GLPI с плагином Fields для возможности добавления дополнительных полей, в сущности, описываемые GLPI, а именно добавление поля CVE в сущность программного обеспечения. Хотя GLPI и не является полнофункциональной системой управления ИТ активами ее функционала, а именно хранение сведений об активах, достаточно в рамках проводимого исследования. В качестве сборщиков данных об установленном на тестовых хостах программном обеспечении рассматривались сканер безопасности RedCheck, как специализированный инструмент для обнаружения уязвимостей, а также плагин для GLPI – FusionInventory, как инструмент для инвентаризации конечных устройств (АРМы, сетевое оборудование и т.д.).

Идея исследования заключается в формировании CVE-идентификаторов, либо их получения через API NVD на базе информации, полученной при помощи инструментов сбора данных, для их последующего применения в рамках пассивного обнаружения уязвимостей в ИТ инфраструктуре.

Рассмотрим какие данные о программном обеспечении можно получить при помощи инструментов, приведенных выше. Для сравнения FusionInventory был запущен в штатном режиме, RedCheck в режиме «Инвентаризация» с указанием дополнительной опции – OVAL-инвентаризация.

Не смотря на разные цели инструментов каждый выдал в результате работы схожий набор данных, из которых наиболее важными для формирования CVE-идентификатора являются имя и версия программного обеспечения. Однако RedCheck в силу своей изначальной специализированной направленности дает больше информации за счет дополнительной OVAL-инвентаризации, а именно обнаружения установленного ПО при помощи OVAL-определений из OVALdb [14]. Результаты OVAL-инвентаризации представляют из себя список установленного программного обеспечения в виде CVE-идентификаторов, однако в большей массе они неполные и не являются информативными для процесса управления уязвимостями. Так же OVAL-инвентаризация покрывает лишь малую часть программного обеспечения, установленного на сканируемом сетевом узле ИТ инфраструктуры, что так же понижает информативность.

Дополнительно RedCheck имеет возможность получения CVE-идентификатора посредством проведения сканирования хостов на уязвимости в режимах «Аудит» и «Пентест». В таком случае можно провести обратную интерпретацию CVE-идентификатора посредством API NVD и внести его в карточку целевого программного обеспечения в системе управления ИТ активами, но эти записи будут актуальны только до момента устранения уязвимости посредством обновления (изменится версия), что сделает CVE-идентификатор автоматически устаревшим. Последующие сканирования в следствии отсутствия уязвимостей не сгенерируют актуальный CVE-идентификатор, что делает применение сканирования на уязвимости как инструмента для получения данных о программном обеспечении не применимым.

Таким образом для формирования и поддержания в актуальном состоянии CVE-идентификаторов внутри системы управления ИТ активами возможно использовать лишь данные, полученные в результате инвентаризации.

Так как для получения CVE-идентификатора требуется название программного обеспечения в качестве примера рассмотрим СУБД PostgreSQL 16 на Windows-хосте и пакет python3 на хосте под управлением Linux.

По логике одним из вариантов автоматизации процесса является выделение имени и версии программного обеспечения из системы управления ИТ активами, с последующей подготовкой запроса к API NVD. Однако в рамках проводимого анализа удалось обнаружить ряд проблем, которые делают данную задачу неразрешимой.

Первой и наиболее значимой проблемой является то, что получаемые в результате инвентаризации имена программного обеспечения очень редко могут дать однозначный ответ при запросе к API NVD (для российских IP это может делаться и намеренно). Так, например, CPE-идентификатор для приведенного в пример СУБД PostgreSQL 16 будет выглядеть следующим образом «cpe:2.3:a:postgresql:postgresql:16.3:*:*:*:*:*». Однако при выполнении запроса к API с указанием поиска по ключевым словам – в данном случае поиск по непосредственному имени программного обеспечения PostgreSQL 16 – результат его выполнения содержит в себе 22 CPE-идентификатора. Данный результат можно объяснить тем, что СУБД PostgreSQL 16 имеет релизы не только для операционных систем семейства Windows, но и для различных дистрибутивов Linux, что порождает отдельные CPE-идентификаторы, их количество так же умножает и наличие различных патчей (обновлений) у версии 16. Приведенный результат является наиболее качественным, но может произойти и обратная ситуация – прямой поиск по имени Notepad++ (64-bit x64) приведет к нулевому результату, хотя CPE-идентификатор для данного программного обеспечения существует. Такая проблема характерна для большого количества программных продуктов в рамках операционной системы Windows, так как сведения о названии и версии технически попадают в систему от разработчиков, у каждого из которых свое видение того какую информацию необходимо отразить в этих полях.

Рассматривая операционные системы семейства Linux, в которых в сравнении с Windows более унифицированная система именования программного обеспечения, а именно расширенное наименование пакета отражающее название и версию любого установленного пакета, можно так же явно увидеть проблемы с применением CPE. Так в случае пакета python3, для которого CPE-идентификатор имеет вид «cpe:2.3:a:python:python:3.1:*:*:*:*:*», при запросе с прямым указанием имени получим лишь один CPE-идентификатор, который описывает расширение для поддержки RestfulAPI – «cpe:2.3:a:python3-restfulapi_project:python3-restfulapi:-:*:*:*:*:*». Так же в рамках отдельных дистрибутивов существует практика закрепления уязвимостей конкретного пакета за идентификатором операционной системы, в качестве примера можно привести уязвимость CVE-2018-14574 в программном обеспечении Django, но при этом имеющая CPE-идентификатор «cpe:2.3:o:canonical:ubuntu_linux:18.04:*:*:*:*:*».

Потенциально существует возможность получения валидных CPE-идентификаторов посредством обращения к API NVD, при условии предварительной обработки имен программного обеспечения полученных в результате сбора данных, например посредством парсинга с помощью регулярных выражений. Однако из-за высокой степени уникальности получаемых имён программного обеспечения, данная задача является крайне трудоемкой, если вообще выполнимой. Сложность этой задачи помимо того, что ограничивает взаимодействие с API NVD, так же затрудняет второй вариант получения CPE-идентификаторов из собранных данных, а именно самостоятельную генерацию. Однако, не смотря на сложность, исследователями постоянно предпринимаются попытки автоматизации формирования CPE-идентификаторов при регистрации новых уязвимостей при помощи различных методов [15–17].

Отдельно стоит сказать про программное обеспечение отечественной разработки, которое повсеместно применяется в российских организациях [18–20]. Множество уязвимостей такого программного обеспечения имеют лишь идентификатор БДУ банка данных угроз ФСТЭК [11] и не содержат информацию о наличии CPE. В качестве примера такой уязвимости можно привести BDU:2021-05103 операционной системы Синергия.

Вышеописанные проблемы обосновывают необходимость создания национальной системы для государственного регулирования именования и идентификации программного обеспечения. Хотя некоторые инструменты и используют CPE-идентификаторы для обогащения описания обнаруженных уязвимостей, их применение в рамках изначальной идеи, заложенной в систему именования CPE в нынешних условиях, является крайне сложной задачей.

3. Концептуальная схема национальной системы для государственного регулирования именования и идентификации программного обеспечения в Российской Федерации. Реестр российского программного обеспечения [10] взаимодействует с БДУ ФСТЭК [11] на уровне информирования пользователя о наличии уязвимостей в зарегистрированном программном обеспечении. В рамках реализации Национальной системы для государственного регулирования именования и идентификации программного обеспечения (СИИПО) предлагается расширение взаимодействия этих агрегаторов данных. Реестр отечественного программного обеспечения [10] предоставит техническую информацию для формирования уникальных идентификаторов программного и программно-аппаратного обеспечения, например, информацию о производителе, типе (классификаторы), имени программного обеспечения и иную информацию. Предположительная структура хранения данных о программном обеспечении представлена на рис. 1.

При регистрации новой уязвимости в БДУ ФСТЭК [11] предоставляется возможность выбора значений параметров уязвимого программного обеспечения из доступного фиксированного множества значений, определенных СИИПО, например, «операционная система» и «аппаратная платформа». В случае создания новой записи, например, регистрация первой уязвимости для новой версии программного обеспечения, заявки модерируются регулятором с целью контроля создания записей в системе хранения.

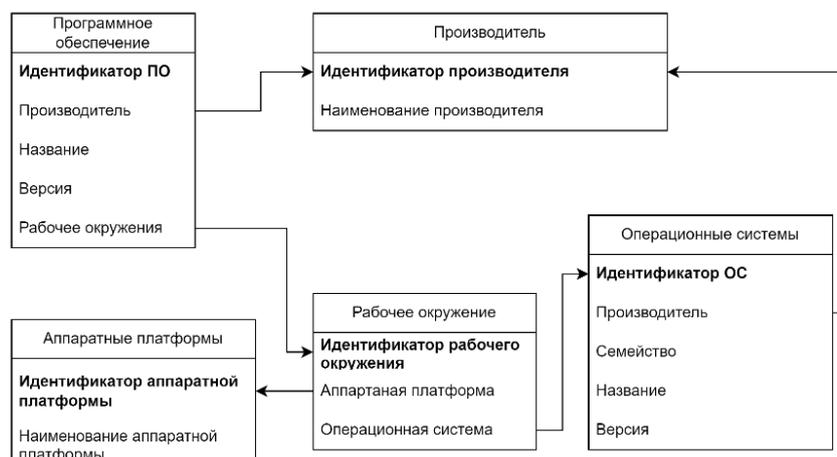


Рис. 1. Предположительная структура хранения данных СИИПО

Для наглядности стоит рассмотреть вариант обращения к СИИПО на примере, ранее рассмотренного PostgreSQL 16. Так информация, собранная RedCheck, в структурированном виде (JSON) может иметь следующий вид (рис. 2).

```
{
  "vendor": "PostgreSQL Global Development Group",
  "name": "PostgreSQL 16",
  "version": "16.3-1",
  "OS": "Майкрософт Windows 11 Pro",
  "hardware": "64-bit"
}
```

Рис. 2. Структурированная информация о PostgreSQL 16

Структурированная информация о программном обеспечении используется для запроса к API СИИПО. На стороне регулятора происходит поиск по существующим записям СИИПО – комбинация значений атрибутов «Операционная система» и «Аппаратная платформа» формируют «Рабочее окружение», значение которого сокращает область поиска до совместимого ПО, а атрибуты программного обеспечения позволяют найти

однозначный идентификатор в сущности «Программное обеспечение». Таким образом, результатом выполнения запроса к API СИИПО является уникальный идентификатор программного обеспечения.

Идентификатор программного обеспечения можно представить в виде UUID (universally unique identifier), где каждое значение атрибута программного обеспечения будет закодировано в битовую последовательность фиксированной длины. Использование не самого значения атрибута, а сопоставленного ему стандартизированного кода позволит значительно сократить выделяемую для хранения память. Для некоторых атрибутов уже существуют стандартные значения, например, для операционной системы или аппаратной платформы. Для демонстрации идеи на рис. 3 приведен возможный способ генерации идентификатора программного обеспечения.

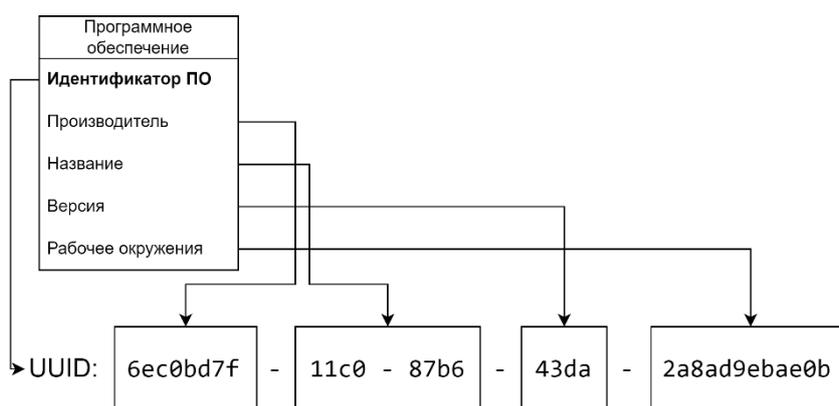


Рис. 3. Генерация UUID программного обеспечения

Технически возможно рассматривать два варианта получения идентификатора для последующей идентификации программного обеспечения:

1) отправка структурированной информации (рис. 2) о программном обеспечении через запрос к API СИИПО, генерация и поиск идентификатора на стороне СИИПО и возвращение полученного значения клиенту;

2) для снижения нагрузки на API СИИПО рекомендуется заранее утвердить явно стандартный алгоритм генерации идентификатора на основе структурированной информации о программном обеспечении. В таком случае можно получить идентификатор локально в информационной системе предприятия, без обращения к API СИИПО.

Таким образом, предполагается, что сбор данных о программном обеспечении и обогащение системы управления ИТ активами выполняет в информационной системе агент на конечном устройстве. Для гарантированного поддержания сведений, хранящихся в системе управления ИТ активами в актуальном состоянии, задача данного агента должна выполняться постоянно или периодически. Решение данной задачи является ответственностью специалистов на местах, так как структура хранения данных может изменяться в зависимости от применяемой системы управления ИТ активами.

Стоит отметить, что в рамках приведенной схемы предполагается что агент будет локально хранить в себе необходимую информацию для преобразования собранных данных о программном обеспечении в уникальные идентификаторы (ближайший аналог – CVE Dictionary). Для актуализации этих сведений предполагается периодический опрос СИИПО агентом. Такой подход необходим для снижения нагрузки на API СИИПО.

Полученный идентификатор будет применяться в приложении сканере уязвимостей (в качестве ближайшего аналога можно рассматривать ScanOVAL) для запроса к БДУ ФСТЭК [10] на уровне запроса к API (или ручного поиска) с целью однозначной идентификации уязвимого программного обеспечения (через уникальный идентификатор) и получение информации об актуальных для него уязвимостей – пассивный анализ ИТ активов на наличие уязвимостей в целевой ИТ инфраструктуре посредством отдельного приложения.

Данное приложение так же может выполняться периодически, тем самым пополняя систему управления ИТ активами данными об уязвимостях, которые присутствуют в ИТ инфраструктуре. Так же используя метод автоматизации из работы [21], можно обогатить записи об уязвимостях для их лучшей интеграции с требованиями методического документа «Методика оценки уровня критичности уязвимостей программных, программно-аппаратных средств» [22].

Обобщенный алгоритм применения предлагаемой авторами СИИПО в реальных процессах управления уязвимостями приведен на рис. 4.

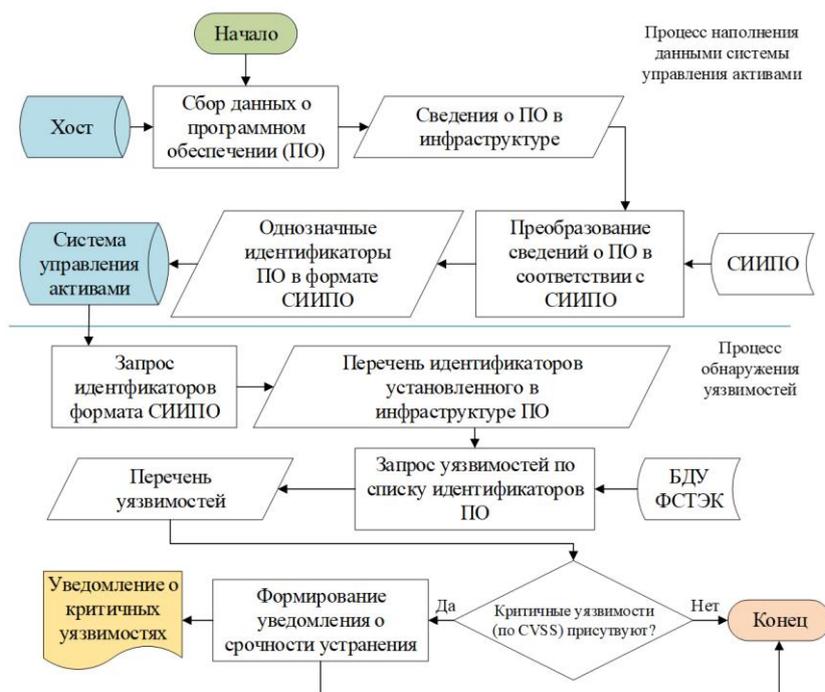


Рис. 4. Обобщенный алгоритм применения СИИПО в процессах управления уязвимостями

Исходя из такой логики применения СИИПО в реальных процессах управления уязвимостями можно выделить ряд преимуществ:

1) Соответствие показателям эффективности введенных регулятором. Так, например, при периодическом опросе БДУ ФСТЭК раз в час, в худшем случае срок получения сведений о критичных уязвимостях программного обеспечения имеющегося в целевой инфраструктуре будет составлять не более часа, что оставляет 23 часа на устранение уязвимости.

2) Уменьшение расходов на специализированные решения, такие как сканеры безопасности или решения класса Vulnerability Management, так как для функционирования требуется лишь система управления ИТ активами, в качестве которой может выступать решение с открытым исходным кодом, например, ранее упомянутый GLPI. Фактически, такой подход открывает возможность построения процесса управления уязвимостями для организации с низким уровнем зрелости ИБ или со значительно ограниченными ресурсами, например муниципальным учреждениям.

3) Потенциально возможно частичное решение проблемы с программным обеспечением собственной разработки [23], так как система управления ИТ активами может хранить сведения о зависимостях, применяемых в программном обеспечении собственной разработки, а в следствии и данные об уязвимостях в этих зависимостях.

Заключение. Проблема однозначного именования и идентификации программного обеспечения является значимой и актуальной, так как ее решение может значительно повлиять на процессы управления уязвимостями. Существующие решения, в частности CPE как наиболее успешный вариант, хоть и несли в себе идею их масштабного применения с течением времени пришли к тому, что они либо не применимы, либо могут лишь частично покрыть запросы специалистов. Помимо этого, некорректная эксплуатация систем привела к значительному усложнению их практического применения. В таком случае идея создания национальной системы для государственного регулирования именования и идентификации программного обеспечения в перспективе открывает обширное количество возможностей для качественного развития управления уязвимостями в России и повышение защищенности ее информационных систем. В качестве направления развития данной работы можно выделить непосредственное формирование универсального идентификатора на основе данных, полученных на этапе сбора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методический документ ФСТЭК от 17 мая 2023 г. «Руководство по организации процесса управления уязвимостями в органе (организации)». – URL: <https://fstec.ru/files/1096/---17--2023-/2011/---17--2023-.pdf> (дата обращения: 10.05.2024).
2. Computer Security Incident Handling Guide. – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-61r2.pdf> (дата обращения: 10.05.2024).
3. Wang Z. et al. Design and implementation of security vulnerability sharing platform based on web crawler // Proceedings of the 11th International Conference on Computer Engineering and Networks. – Springer Singapore, 2022. – P. 678-687.
4. Bonomi S., Cuoci M., Lenti S. A Version-Based Algorithm for Quality Enhancement of Automatically Generated Vulnerability Inventories // 2024 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR). – IEEE, 2024. – P. 76-81
5. Luo J. et al. CVECenter: Industry Practice of Automated Vulnerability Management for Linux Distribution Community // Companion Proceedings of the 32nd ACM International Conference on the Foundations of Software Engineering. – 2024. – P. 329-339.
6. Ghazo A.T.A.L., Kumar R. ANDVI: Automated Network Device and Vulnerability Identification in SCADA/ICS by Passive Monitoring // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2024.
7. Leverett É., Rhode M., Wedgbury A. Vulnerability Forecasting: Theory and practice // Digital Threats: Research and Practice. – 2022. – Vol. 3, No. 4. – P. 1-27
8. National Vulnerability Database. – URL: <https://www.nist.gov/itl/nvd> (дата обращения: 10.05.2024).
9. Ncube Z.M. Emerging Threats in Cybersecurity: Risk and Vulnerability Management // Journal of Innovative Technologies. – 2024. – Vol. 7, No. 1.
10. Реестр программного обеспечения. – URL: <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/> (дата обращения: 10.05.2024).
11. Банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК. – URL: <https://bdu.fstec.ru/threat> (дата обращения: 10.05.2024).
12. Селигеев С.В., Жуков В.Г. О пассивном обнаружении уязвимостей программного обеспечения // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сб. материалов X Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию академика М.Ф. Решетнева и Дню космонавтики. В 3-х т., Красноярск, 8–12 апреля 2023 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2024. – С. 277-279.
13. Ecik H. Comparison of active vulnerability scanning vs. passive vulnerability detection // 2021 International Conference on Information Security and Cryptology (ISCTURKEY). – IEEE, 2021. – P. 87-92.
14. OVALdb. – URL: <https://www.altx-soft.ru/ovaldb/> (дата обращения: 10.05.2024).
15. McClanahan K., Li Q. Towards Automatically Matching Security Advisories to CPEs: String Similarity-based Vendor Matching // Proceedings of the IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)-Workshop on Computing, Networking and Communications. – 2024.
16. Hu W., Thing V.L.L. CPE-Identifier: Automated CPE identification and CVE summaries annotation with Deep Learning and NLP // arXiv preprint arXiv:2405.13568. – 2024.
17. Wåreus E., Hell M. Automated CPE labeling of CVE summaries with machine learning // Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment: 17th International Conference, DIMVA 2020, Lisbon, Portugal, June 24–26, 2020, Proceedings 17. – Springer International Publishing, 2020. – P. 3-22.

18. Михайлов В.А. Российская система для полного цикла управления уязвимостями // Первая миля. – 2024. – № 3 (119). – С. 70-71. – DOI: 10.22184/2070-8963.2024.119.3.70.71. – EDN CIQOTG.
19. Дорофеев А.В., Марков А.С. Применение отечественных технологий для мониторинга информационной безопасности в условиях импортозамещения // Защита информации. Инсайд. – 2023. – № 3 (111). – С. 20-26. – EDN FDPTDW.
20. Марунько А.С., Попов И.О. Современная проблематика управления ИТ-активами в Российской Федерации // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2023. – № 4. – С. 91-95. – DOI: 10.37882/2223-2966.2023.04.24. – EDN AMAULO.
21. Жуков В.Г., Селигеев С.В. Автоматизация оценки уязвимостей программных, программно-аппаратных средств в целевой информационной системе // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – № 4 (64). – С. 16-25. – DOI: 10.54398/20741707_2023_4_16. – EDN SRMLBD.
22. Методический документ ФСТЭК «Методика оценки уровня критичности уязвимостей программных, программно-аппаратных средств». – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g-2> (дата обращения: 10.05.2024).
23. Селигеев С.В., Жуков В.Г. О проблеме управления уязвимостями в программном обеспечении собственной разработки // Решетневские чтения: Матер. XXVII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, 08–10 ноября 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 401-403. – EDN SGTJSB.

REFERENCES

1. Metodicheskiy dokument FSTEK ot 17 maya 2023 g. «Rukovodstvo po organizatsii protsessa upravleniya uyazvimostyami v organe (organizatsii)» [FSTEC Methodological Document of May 17, 2023 “Guidelines for Organizing the Vulnerability Management Process in a Body (Organization)”]. Available at: URL: <https://fstec.ru/files/1096/---17--2023-/2011/---17--2023-.pdf> (accessed 10 May 2024).
2. Computer Security Incident Handling Guide. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-61r2.pdf> (accessed 10 May 2024).
3. Wang Z. et al. Design and implementation of security vulnerability sharing platform based on web crawler, *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Engineering and Networks*. Springer Singapore, 2022, pp. 678-687.
4. Bonomi S., Cuoci M., Lenti S. A Version-Based Algorithm for Quality Enhancement of Automatically Generated Vulnerability Inventories, *2024 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR)*. IEEE, 2024, pp. 76-81
5. Luo J. et al. CVECenter: Industry Practice of Automated Vulnerability Management for Linux Distribution Community, *Companion Proceedings of the 32nd ACM International Conference on the Foundations of Software Engineering*, 2024, pp. 329-339.
6. Ghazo A.T.A.L., Kumar R. ANDVI: Automated Network Device and Vulnerability Identification in SCADA/ICS by Passive Monitoring, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024.
7. Leverett É., Rhode M., Wedgbury A. Vulnerability Forecasting: Theory and practice, *Digital Threats: Research and Practice*, 2022, Vol. 3, No. 4, pp. 1-27
8. National Vulnerability Database. Available at: <https://www.nist.gov/itl/nvd> (accessed 10 May 2024).
9. Ncube Z.M. Emerging Threats in Cybersecurity: Risk and Vulnerability Management, *Journal of Innovative Technologies*, 2024, Vol. 7, No. 1.
10. Reestr programmogo obespecheniya [Software registry]. Available at: <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/> (accessed 10 May 2024).
11. Bank dannykh ugroz bezopasnosti informatsii FSTEK [FSTEC information security threat database]. Available at: <https://bdu.fstec.ru/threat> (accessed 10 May 2024).
12. Seligeev S.V., Zhukov V.G. O passivnom obnaruzhenii uyazvimostey programmogo obespecheniya [On passive detection of software vulnerabilities], *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики: Sb. materialov X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu akademika M.F. Reshetneva i Dnyu kosmonavтики. V 3-kh t., Krasnoyarsk, 8–12 aprelya 2023 goda* [Actual problems of aviation and cosmonautics: Collection of materials of the X International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of academician M.F. Reshetnev and Cosmonautics Day. In 3 volumes, Krasnoyarsk, April 8–12, 2023]. Krasnoyarsk: Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M.F. Reshetneva, 2024, pp. 277-279.

13. *Ecik H.* Comparison of active vulnerability scanning vs. passive vulnerability detection, *2021 International Conference on Information Security and Cryptology (ISCTURKEY)*. IEEE, 2021, pp. 87-92.
14. OVALdb. Available at: <https://www.altx-soft.ru/ovaldb/> (accessed 10 May 2024).
15. *McClanahan K., Li Q.* Towards Automatically Matching Security Advisories to CPEs: String Similarity-based Vendor Matching, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)-Workshop on Computing, Networking and Communications*, 2024.
16. *Hu W., Thing V.L.L.* CPE-Identifier: Automated CPE identification and CVE summaries annotation with Deep Learning and NLP, *arXiv preprint arXiv:2405.13568*, 2024.
17. *Wäreus E., Hell M.* Automated CPE labeling of CVE summaries with machine learning, *Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment: 17th International Conference, DIMVA 2020, Lisbon, Portugal, June 24–26, 2020, Proceedings 17*. Springer International Publishing, 2020, pp. 3-22.
18. *Mikhaylov V.A.* Rossiyskaya sistema dlya polnogo tsikla upravleniya uyazvimostyami [Russian system for a full cycle of vulnerability management], *Pervaya milya [Pervaya mile]*, 2024, No. 3 (119), pp. 70-71. DOI: 10.22184/2070-8963.2024.119.3.70.71. EDN CIQOTG.
19. *Dorofeev A.V., Markov A.S.* Primenenie otechestvennykh tekhnologiy dlya monitoringa informatsionnoy bezopasnosti v usloviyakh importozameshcheniya [Application of domestic technologies for monitoring information security in the context of import substitution], *Zashchita informatsii. Insayd [Information protection]*, 2023, No. 3 (111), pp. 20-26. EDN FDPTDW.
20. *Marun'ko A.S., Popov I.O.* Sovremennaya problematika upravleniya IT-aktivami v Rossiyskoy Federatsii [Modern problems of IT asset management in the Russian Federation], *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Modern science: current problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences]*, 2023, No. 4, pp. 91-95. DOI: 10.37882/2223-2966.2023.04.24. EDN AMAULO.
21. *Zhukov V.G., Seligeev S.V.* Avtomatizatsiya otsenki uyazvimostey programmykh, programmno-apparatnykh sredstv v tselevooy informatsionnoy sisteme [Automation of vulnerability assessment of software, software and hardware in the target information system], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii [Caspian Journal: Management and High Technologies]*, 2023, No. 4 (64), pp. 16-25. DOI: 10.54398/20741707_2023_4_16. EDN SRMLBD.
22. Metodicheskiy dokument FSTeK «Metodika otsenki urovnya kritichnosti uyazvimostey programmykh, programmno-apparatnykh sredstv» [FSTeK Methodological Document "Methodology for Assessing the Criticality Level of Vulnerabilities in Software, Software and Hardware"]. Available at: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g-2> (accessed 10 May 2024).
23. *Seligeev S.V., Zhukov V.G.* O probleme upravleniya uyazvimostyami v programmnom obespechenii sobstvennoy razrabotki [On the Problem of Vulnerability Management in In-House Software], *Reshetnevskie chteniya: Mater. XXVII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva*, Krasnoyarsk, 08–10 noyabrya 2023 goda [Reshetnev Readings: Proceedings of the XXVII International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Memory of the General Designer of Rocket and Space Systems, Academician M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, November 8-10, 2023]. Krasnoyarsk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologiy imeni akademika M.F. Reshetneva", 2023, pp. 401-403. EDN SGTSJB.

Жуков Вадим Геннадьевич – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева; e-mail: zhukov@sibsau.ru; г. Красноярск, Россия; тел.: +73912227639; к.т.н.; доцент.

Селигеев Сергей Викторович – e-mail: seligeevsergei@gmail.com; тел.: +79135845060; ассистент.

Zhukov Vadim Gennad'evich – Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; e-mail: zhukov@sibsau.ru; Krasnoyarsk, Russia; phone: +73912227639; cand. of eng. sc.; associate professor.

Seligeev Sergej Viktorovich – e-mail: seligeevsergei@gmail.com; phone: +79135845060; assistant.

А.А. Львов, Б.М. Кац, П.А. Львов, В.П. Мещанов, К.А. Саяпин

**АНАЛИЗАТОРЫ СВЧ-ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ МНОГОЗОНДОВЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ. ОБЗОР МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ,
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ОБЗОР)**

Дальнейший прогресс в СВЧ-технологии неразрывно связан с созданием новых прецизионных автоматических измерительных систем. В нашей стране не выпускаются серийно векторные анализаторы СВЧ-цепей, которые могут измерять амплитудные и фазовые соотношения S-параметров исследуемых микроволновых нагрузок. Использование многопортовых рефлектометров (МР) в качестве измерительных устройств в составе автоматических анализаторов цепей на СВЧ позволяет создавать относительно дешевые и высокоточные приборы для исследования параметров нагрузок. В статье дан обзор работ, в которых развивается метод МР, когда последний может быть представлен многозондовой измерительной линией (МИЛ). Кратко описана история развития методов измерения с помощью традиционных МР и показано, что главной проблемой их использования является калибровка рефлектометра, которая может быть проведена точно только с использованием набора прецизионных калибровочных средств. Подробно исследована МИЛ, являющаяся частным случаем МР. Показано, что случайные ошибки измерения методом МИЛ выше, чем у точно откалиброванного МР. Однако МИЛ обладает важными достоинствами, которые обуславливаются в работе. Описана стратегия повышения точности измерения с помощью МИЛ: 1) предложены оптимальные методы обработки выходных сигналов с зондов МИЛ по методу максимального правдоподобия; 2) подробно исследованы методы калибровки датчиков МИЛ и показано, что она может быть откалибрована по набору неточно известных нагрузок с параллельной их аттестацией, поэтому значительно снижаются систематические ошибки калибровки; 3) исследованы методы оптимизации конструкции МИЛ за счет расположения зондов внутри СВЧ-тракта для измерения с максимальной точностью в узком и широком диапазонах частот, а также показано, как можно измерять с потенциально достижимой точностью за счет надлежащего выбора весовых коэффициентов у зондов МИЛ. Исследуются случайные и систематические ошибки измерения ККО СВЧ-нагрузок, а также неопределенности измерения типа А и В методом МИЛ и приводятся ссылки на соответствующие работы. В заключение рассмотрены возможности совместного использования методов МИЛ и МР, кратко описан комбинированный МР, который измеряет с точностью, характерной для традиционного МР, но может быть откалиброван по набору неизвестных нагрузок, что свойственно методу МИЛ.

Автоматический анализатор цепей; многопортовый рефлектометр; многозондовая измерительная линия; метод максимального правдоподобия; дисперсионная матрица ошибок; калибровка измерителя.

A.A. L'vov, B.M. Kats, P.A. L'vov, V.P. Meschanov, K.A. Sayapin

**MICROWAVE CIRCUIT ANALYZERS ON A MULTI-PROBE MEASURING LINE.
REVIEW OF SIGNAL PROCESSING METHODS, PROBLEMS AND PROSPECTS
(REVIEW)**

Further progress in microwave technology is inextricably linked with the creation of new precision automatic measuring systems. In our country, microwave circuit vector analyzers that can measure the amplitude and phase relationships of the S-parameters of the microwave networks under test are not mass-produced. The use of multi-port reflectometers (MPR) as measuring devices in automatic microwave circuit analyzers allows creating relatively cheap and high-precision devices for studying load parameters. The paper provides an overview of the works in which the MPR method is developed, when the latter can be represented by a multi-probe transmission line reflectometer (MTLR). The history of the development of measurement methods using traditional MPR is briefly described and it is shown that the main problem of their use is reflectometer calibration, which can be carried out accurately only using a set of precision calibration standards. MTLR, which is a special case of MPR, is studied in detail. It is shown that random measurement errors by the MTLR method are higher than those of a precisely calibrated MR. However, the MTLR has important advantages that are discussed in the paper. A strategy for increasing the measurement accuracy using the MTLR is described: 1) optimal methods for processing output signals from the MTLR probes using the maximum likelihood method are proposed; 2) methods for calibrating the

MTLR sensors are studied in detail and it is shown that it can be calibrated using a set of inaccurately known loads with their parallel certification, therefore, systematic calibration errors are significantly reduced; 3) methods for optimizing the MTLR design by arranging the probes inside the microwave path for measuring with maximum accuracy in narrow and wide frequency ranges are studied, and it is also shown how it is possible to measure with potentially achievable accuracy due to the proper choice of weighting coefficients in the MTLR probes. Random and systematic errors in measuring the complex reflection index of microwave loads, as well as uncertainties in measuring types A and B by the MTLR method are investigated, and references to relevant works are given. In conclusion, the possibilities of joint use of the MTLR and MPR methods are considered, a combined MPR is briefly described, which measures with an accuracy characteristic of a traditional MPR, but can be calibrated using a set of unknown loads, which is inherent in the MTLR method. Automatic network analyzer, multi-pole reflectometer, multi-probe measuring line, maximum likelihood method, error dispersion matrix, meter calibration.

Automatic network analyzer; multi-port reflectometer; multi-probe transmission line reflectometer; maximum likelihood method; error matrix; meter calibration.

Введение. Развитие техники связи, военной и космической техники, решение многих прикладных задач в машиностроении, например, бесконтактный контроль параметров технологических процессов и состояния оборудования, опираются на точные измерения электромагнитных величин [1, 2]. Как известно, качество функционирования систем, работающих на СВЧ, во многом зависит от точности их прецизионной настройки, которая невозможна без наличия соответствующей высокоточной измерительной аппаратуры, поэтому дальнейший прогресс в СВЧ-технологии неразрывно связан с созданием новых прецизионных автоматических измерительных систем.

К сожалению, в нашей стране не выпускаются серийно векторные анализаторы СВЧ-цепей, которые могут измерять амплитудные и фазовые соотношения S-параметров исследуемых микроволновых нагрузок и многополюсников. Поэтому отечественные исследователи, как правило, пользуются импортными автоматическими анализаторами цепей (ААЦ), выпускаемыми известными производителями (например, *Keysight Technologies*, США [3]). Все подобные анализаторы основаны на методе векторного вольтметра, понижающие частоту исследуемого сигнала гетеродинным способом. Они обладают несомненными достоинствами, но содержат большой объем высокоточного СВЧ-оборудования, сложны в настройке и, как следствие, являются очень дорогостоящими приборами [2]. По этой причине импортные ААЦ не могут широко использоваться в радиолокационных системах измерения доплеровских скоростей объектов или угла прихода сигнала, а также в измерителях контроля параметров работы динамических объектов, например, вибраций, ускорений, скоростей, перемещений.

Проблеме снижения стоимости автоматических измерителей на СВЧ без потери в их точности уделяется самое пристальное внимание с момента выхода в свет пионерских публикаций Г. Энгена и К. Хоера в 1972-1973 гг. [4, 5]. Эти авторы выдвинули идею замены традиционных дорогостоящих анализаторов СВЧ-цепей предельно простыми измерительными устройствами, содержащими многополюсный рефлектометр (МР), к выходным портам которого подсоединяются обыкновенные измерители мощности. Впоследствии метод многополюсника подвергся самым серьезным исследованиям, как за рубежом [6, 7], так и в СССР [8, 9]. Однако, несмотря на достигнутые значительные успехи и разработку большого числа самых разнообразных экспериментальных измерительных установок на основе МР, никто из исследователей не смог до конца преодолеть всех трудностей, связанных, прежде всего, с точной калибровкой его датчиков. Было предложено большое число методов калибровки измерителей, использующих МР, [10–12]. Исследователями установлено, что для точной калибровки многополюсника (чаще всего используется двенадцатиполусник) требуется использовать от четырех до семи прецизионных эталонов отражения и передачи на каждой частоте измерения. Как следствие, в мире до сих пор не выпускаются серийно векторные ААЦ, основанные на МР. Более того, подобные измерительные системы, измеряющие с высокой точностью, удалось создать только в нескольких метрологических лабораториях ведущих стран мира, где их можно точно откалибровать с помощью имеющихся там прецизионных калибровочных средств. Однако стоимость подобных автоматических измерителей превосходит стоимость ААЦ на векторном вольтметре.

Тем не менее, были попытки использования двенадцатиполусного рефлектометра (ДПР) в измерительных системах для различных технических приложений. В работе [13] описаны результаты использования ДПР для измерения малых скоростей движущихся объектов с помощью доплеровского радара, измерения угла прихода радиолокационного сигнала и в качестве волнового коррелятора в радиолокационной системе с фазированной антенной решеткой. Наконец, в работах [14, 15] даны примеры применения ДПР в качестве приемников сигналов в системах связи, в частности, программно-конфигурируемой радиосвязи. Однако эти попытки практического применения ДПР, нельзя считать удачными из-за низкой точности измерений. Основными источниками ошибок, которые подробно анализируются в [16], являются неудачно выбранная методика обработки цифровых сигналов с выходов датчиков и низкая точность калибровки измерительных систем на основе ДПР.

Отечественные исследователи, разрабатывающие СВЧ-измерители, остановили свое внимание на разновидности МР – многозондовой измерительной линии (МИЛ) – линейном устройстве с регулярным поперечным сечением (волноводное, коаксиальное или микрополосковое исполнение), вдоль центральной продольной оси которого располагаются измерительные датчики (зонды), слабо связанные с полем внутри СВЧ-тракта линии. По этой причине на выходе датчиков МИЛ отношение сигнал/шум получается малым по сравнению с выходными сигналами ДПР (как минимум на 10 дБ), и зарубежные исследователи сразу же потеряли к ней практический интерес. Однако, ААЦ, использующие МИЛ, обладают рядом важных свойств, что позволяет свести к минимуму систематические погрешности измерения и делает этот измеритель конкурентоспособным с точки зрения достигаемой точности. При этом МР в виде МИЛ существенно проще и дешевле в реализации. Кроме того, традиционная процедура калибровки МИЛ существенно проще калибровки известных ДПР и требует всего одного точно известного эталона отражения. Ввиду сказанного метод МИЛ получил достаточно широкое распространение среди отечественных разработчиков измерительной аппаратуры на СВЧ.

Цель работы: сделать обзор отечественных работ, посвященных разработке и созданию микроволновых измерительных приборов на основе многозондовой измерительной линии; продемонстрировать возможности этих приборов при работе в узком и широком диапазоне частот измерений, обсудить дальнейшие перспективы использования в СВЧ-метрологии.

1. Математическая модель МИЛ и результаты ранних исследований. Впервые ААЦ в виде МИЛ был представлен в работе Р. Калдекотта [17] практически одновременно с появлением первых работ Г. Энгена и К. Хоера.

Процесс измерения с помощью МИЛ состоит в анализе распределения электромагнитного поля внутри линии, которое зависит от параметров исследуемого двухполюсника (модуля и фазы коэффициента отражения) и амплитуды стоячей волны в линии. Структурная схема автоматической установки для измерения параметров СВЧ-нагрузок приведена на рис. 1. Она состоит из синтезатора СВЧ-сигналов *СС*, соединенного через переходное устройство *ПУ* с измерительным СВЧ-трактом МИЛ, вдоль центральной продольной оси которого расположены *N* измерительных зондов D_1, \dots, D_N . Ко второму фланцу линии подключается исследуемый объект *ИО* (нагрузка). Сигналы с датчиков через плату сбора данных *ПСД* поступают в память персонального компьютера *ПК*, который, в свою очередь, управляет частотой синтезатора.

В СВЧ-тракте МИЛ формируется стоячая волна, параметры которой однозначно связаны с параметрами подсоединенных синтезатора и нагрузки. При этом постулируется: 1) в тракте линии нет потерь энергии; 2) датчики расположены на точно известных расстояниях d_1, d_2, \dots, d_N от измеряемой нагрузки; 3) собственные коэффициенты отражения зондов пренебрежимо малы, то есть датчики не нарушают картину поля в тракте линии; 4) детекторы датчиков имеют идеальные квадратичные характеристики.

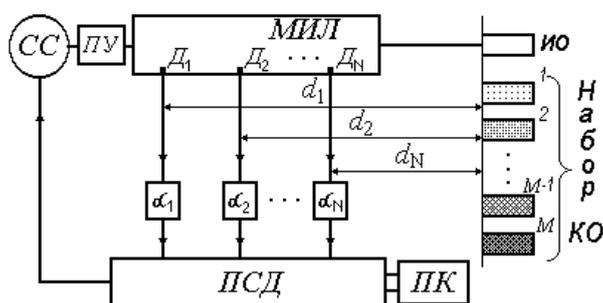


Рис. 1. Структурная схема ААЦ на основе МИЛ: СС – синтезатор СВЧ сигнала, ПУ – переходное устройство, МИЛ – СВЧ-тракт многозондовой измерительной линии, ИО – измеряемый объект (нагрузка), КО – калибровочные объекты, ПСД – плата сбора данных, ПК – персональный компьютер, D_1, \dots, D_N – датчики (зонды)

Чтобы обеспечить требование малости собственных коэффициентов отражения зондов, приходится на их выходах использовать аттенюаторы, сильно ослабляющие связь датчиков с полем внутри МИЛ (менее -30 дБ). В результате на выходе детектора зонда получается относительно малое отношение сигнал/шум, что является серьезной помехой при создании прецизионных измерителей на базе МИЛ. Но при этом хорошо соблюдается требование квадратичности характеристик детекторов из-за малых амплитуд их выходных напряжений (порядка нескольких микровольт). При сделанных допущениях математическая модель МИЛ может быть представлена следующей системой уравнений [17]:

$$u_i = \alpha_i |a|^2 \left| 1 + \Gamma \cdot \exp\left(j \frac{4\pi d_i}{\lambda}\right) \right|^2 + \xi_i \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

где u_i , α_i – напряжение на выходе детектора i -го зонда и коэффициент его передачи; $\Gamma = \rho e^{j\varphi}$ – неизвестный комплексный коэффициент отражения (ККО) исследуемой нагрузки (ρ , φ — его модуль и фаза); a – неизвестная амплитуда стоячей волны в линии; d_i — известное расстояние от фланца измеряемого двухполюсника до i -го зонда; λ – известная длина волны в тракте МИЛ; ξ_i – погрешность измерения напряжения на выходе i -го детектора; N – число зондов МИЛ. Для удобства записи вводится обозначение $\psi_i = 4\pi d_i / \lambda$ – фазовый сдвиг между падающей и отраженной волнами на i -м датчике. Предполагается, что погрешности ξ_i вызваны дробовыми шумами детекторов зондов и тепловыми шумами согласующих усилителей на ПСД, поэтому их с достаточной для практики точностью можно считать независимыми нормально распределенными величинами с нулевыми математическими ожиданиями и неизвестными дисперсиями $\sigma_1^2, \dots, \sigma_N^2$.

Если, следуя работе [17], сделать в (1) замену переменных:

$$\begin{cases} q_1 = a^2(1 + \rho^2); \\ q_2 = a^2 \rho \cos \varphi; \\ q_3 = a^2 \rho \sin \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_{1i} = \alpha_i; \\ x_{2i} = 2\alpha_i \cos(4\pi d_i / \lambda) = 2\alpha_i \cos(\psi_i); \\ x_{3i} = 2\alpha_i \sin(\psi_i); \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (3)$$

то система (1) становится линейной относительно новых неизвестных q_1, q_2, q_3 :

$$u_i = q_1 x_{1i} + q_2 x_{2i} + q_3 x_{3i} + \xi_i \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (4)$$

В уравнениях (1) и (4) всего три неизвестных величины a , ρ , φ или q_1 , q_2 , q_3 , связанных друг с другом соотношениями (2). Поэтому многие исследователи воспользовались идеей Р. Калдекотта и реализовали трехзондовые измерительные линии [18], пренебрегая ошибками ξ_i и решая систему из трех линейных уравнений относительно неизвестных q_1 , q_2 , q_3 . После этого из (2) вычисляли оценки неизвестных ρ и φ , искомого ККО исследуемого двухполосника.

Для расширения частотного диапазона измерений некоторые разработчики использовали МИЛ с большим числом зондов [19–21] от четырех до шести, но при каждом отдельном измерении брались сигналы с трех датчиков. Если же учитывалась измерительная информация с четырех датчиков, то применялись неоптимальные методы ее обработки [19, 20]. По этим причинам точность измерения методом МИЛ была низкой, сравнимой с точностью измерения устройств на длинных линиях с одним подвижным зондом, перемещаемым вдоль линии вручную. Дополнительные погрешности измерения вносили ошибки калибровки МИЛ, для которой использовались согласованные или короткозамкнутые нагрузки с известными параметрами отражения [18, 21], чья точность не была идеальной.

Существенное повышение точности измерений с помощью МИЛ было достигнуто за счет применения статистической методологии к разработке подобных измерителей.

2 Стратегия повышения точности измерителей на основе МИЛ. В середине 80-х годов прошлого века отечественные исследователи начали использовать статистические методы обработки сигналов с датчиков МИЛ. Впоследствии была предложена методология оптимального оценивания параметров СВЧ-нагрузок с помощью ААЦ, использующих МИЛ, которая сформулирована и разработана в [22, 23].

Предлагаемая методология рассматривает единую систему генератор–измеритель–измеряемый объект (ГИИО), схематично показанную на рис. 2, где генератор зондирующего сигнала и измерительная цепь (МИЛ) взаимодействуют с некоторым реальным исследуемым объектом. Исследователя интересуют параметры этого объекта $\mathbf{c} = (\rho, \varphi, a)^T$ (T – операция транспонирования матрицы), которые связаны с вектором состояния всей системы ГИИО $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3)^T$. Измерения сигналов $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_N)^T$, функционально связанных с параметрами \mathbf{c} исследуемого объекта, проводятся с помощью датчиков (зондов) в точках, удаленных от плоскости АА его подсоединения к МИЛ. Причем осознанно выбирается избыточное число датчиков $N \geq 4$ и предполагается, что ошибками измерения сигналов на выходах зондов пренебрегать нельзя.

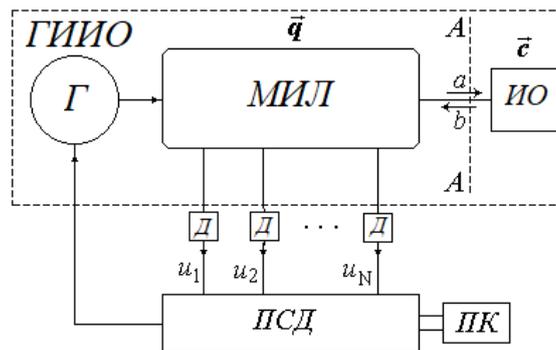


Рис. 2. Структурная схема автоматического анализатора СВЧ-цепей на основе МИЛ: Г – СВЧ-генератор, МИЛ – многозондовая измерительная линия, ИО – исследуемый объект, ГИИО – система «генератор–МИЛ–измеряемый объект», Д – датчики (зонды), ПСД – плата сбора данных, ПК – персональный компьютер

Система ГИИО описывается математической моделью [22, 23]:

$$\mathbf{c} = \mathbf{Z}(\mathbf{q}), \quad \mathbf{u} = \mathbf{F}(\mathbf{q}),$$

где \mathbf{Z} и \mathbf{F} – известные вектор-функции, задаваемые соотношениями (2) и (4).

Сформулированная в [22, 23] стратегия построения анализатора стоячей волны (АСВ) заключается в нахождении оценок параметров состояния системы ГИИО \mathbf{q} по измерениям \mathbf{u} , а после из (2) рассчитываются параметры исследуемого объекта \mathbf{c} . Реализация предложенной методологии состоит из трех взаимосвязанных задач оптимального выбора:

- ◆ алгоритмов обработки измеряемых величин $\mathbf{q} = \mathbf{F}^{-1}(\mathbf{u})$;
- ◆ оптимальной модели системы ГИИО, которая совпадает с задачей калибровки МИЛ;
- ◆ оптимального состава измерений.

При решении первых двух задач предложено обрабатывать выходные сигналы датчиков МИЛ по методу максимального правдоподобия (ММП). Третья задача решается за счет выбора оптимального расположения зондов вдоль тракта линии. Критерием для всех задач оптимизации выступает достижение максимальной точности измерений.

3 Алгоритмы обработки сигналов с датчиков при измерениях ККО. Если число датчиков МИЛ больше трех, то система (4) получается избыточной. При выполнении сделанных допущений относительно ошибок ξ_i оптимальные оценки неизвестных параметров состояния \mathbf{q} могут быть получены из (4) по ММП [22, 23], который дает состоятельные, асимптотически несмещенные и асимптотически эффективные оценки в статистическом смысле. Когда ошибки измерения распределены по нормальному закону, то оценки максимального правдоподобия (ОМП) совпадают с оценками, полученными по методу наименьших квадратов (МНК) [24], поэтому они являются оптимальными в смысле минимума среднего квадрата ошибки оценивания. Подробно алгоритмы обработки выходных сигналов МИЛ по ММП или МНК описаны в работах [25, 26]. Оценки коэффициентов вектора состояния находятся из:

$$\hat{\mathbf{q}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{u}); \quad (5)$$

где \mathbf{X} – матрица плана эксперимента, компонентами которой являются величины x_{ji} из выражений (3); $\mathbf{P} = \text{diag}(p_1, \dots, p_N)$ – диагональная матрица весовых коэффициентов, с которыми измерения \mathbf{u} учитываются при оценивании.

Оценки $\hat{\mathbf{q}}$ вектора состояния, полученные по МНК (5), являются ОМП и обладают всеми их оптимальными свойствами. Далее значения измеряемых параметров $\mathbf{c} = (\rho, \varphi, |a|^2)^T$ вычисляются из выражений, полученных из (2):

$$\hat{\varphi} = \begin{cases} \varpi, & \hat{q}_2 \geq 0, \hat{q}_3 \geq 0; \\ \varpi + \pi, & \hat{q}_2 < 0; \\ \varpi + 2\pi, & \hat{q}_2 > 0, \hat{q}_3 < 0, \end{cases} \quad \hat{\rho} = \sqrt{H - \sqrt{H^2 - 1}}; \quad |\hat{a}|^2 = \hat{q}_1 (1 + H - \sqrt{H^2 - 1})^{-1}, \quad (6)$$

где $0 \leq \hat{\varphi} \leq 2\pi$; $\varpi = \arctg(\hat{q}_3 / \hat{q}_2)$; $H = \frac{\hat{q}_1}{2(\hat{q}_2^2 + \hat{q}_3^2)} - 1$, и учтено, что $0 \leq \rho \leq 1$.

Оценивание параметров состояния на основе решения уравнений (4) по ММП обладает еще одним важным достоинством. При расчете оценок $\hat{\mathbf{q}}$ из (5) необходимо предварительно вычислить симметрическую матрицу $\mathbf{D}_i = (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})$, являющуюся информационной матрицей Фишера [24]. Если обратить эту матрицу, то с точностью до скалярного множителя σ_0^2 получается дисперсионная матрица ошибок измерения:

$$\mathbf{D}[\hat{\mathbf{q}}] = \sigma_0^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} \\ D_{13} & D_{23} & D_{33} \end{pmatrix}^{-1}, \quad (7)$$

где $D_{11} = \sum_{i=1}^N p_i$; $D_{12} = 2 \sum_{i=1}^N p_i \cos \psi_i$; $D_{13} = 2 \sum_{i=1}^N p_i \sin \psi_i$; $D_{22} = 4 \sum_{i=1}^N p_i \cos^2 \psi_i$; $D_{23} = 4 \sum_{i=1}^N p_i \cos \psi_i \sin \psi_i$; $D_{33} = 4 \sum_{i=1}^N p_i \sin^2 \psi_i$. Матрица ошибок $\mathbf{D}[\hat{\mathbf{q}}]$ рассчитывается одновре-

менно с оценками $\hat{\mathbf{q}}$, и она может быть использована при анализе погрешностей измерения и проектировании оптимальных АСВ на основе МИЛ, так как ее детерминант совпадает с квадратом объема эллипсоида рассеяния векторов оценок $\hat{\mathbf{q}}$ относительно истинного значения \mathbf{q} [24].

4. Известные алгоритмы калибровки АСВ на основе МИЛ. В модель МИЛ (1) входят коэффициенты передачи ее зондов α_i ($i = 1, 2, \dots, N$). В [22] показано, что основным источником систематических погрешностей у метода МИЛ являются именно ошибки этих величин. Поиск α_i согласно [23] связан выбором оптимальной модели АСВ, использующего МИЛ. Предварительная оценка величин α_i также известна как калибровка измерителя.

Если вместо исследуемой нагрузки к МИЛ подсоединяется поочередно несколько нагрузок из набора калибровочных объектов, система калибровочных уравнений принимает следующий вид [22, 27]:

$$u_{ij} = q_{1j}x_{1i} + q_{2j}x_{2i} + q_{3j}x_{3i} + \xi_{ij}, \quad (i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, M), \quad (8)$$

где

$$q_{1j} = a_j^2(1 + \rho_j^2); \quad q_{2j} = a_j^2\rho_j \cos\varphi_j; \quad q_{3j} = a_j^2\rho_j \sin\varphi_j, \quad (9)$$

индекс j относится к соответствующему калибровочному объекту (КО) рис. 1.

Известно несколько традиционных методов калибровки МИЛ [17–19]. Они заключаются в подсоединении к линии нагрузок, параметры которых ρ_j и φ_j считаются точно известными (обычно выбираются согласованная или короткозамкнутая нагрузки). В результате уравнения (1) принимают вид:

$$u_{ij} = \alpha_i a_j^2 f_i(\rho_j, \varphi_j) + \xi_{ij}, \quad (i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, M),$$

где $f_i(\rho_j, \varphi_j)$ – известные величины, зависящие от модуля и фазы подсоединенной нагрузки. Так как для решения системы (1) достаточно знать только относительные коэффициенты передачи датчиков МИЛ α_i , то неизвестные параметры a_j^2 легко исключаются из последней системы, если пренебречь ошибками измерений ξ_{ij} , а сами оценки величин α_i получаются пропорциональными напряжениям на выходах датчиков. Но этот метод не позволяет уменьшить систематические погрешности калибровки, связанные с неточным знанием параметров калибровочных нагрузок (величины $f_i(\rho, \varphi)$ вычисляются неточно).

Для снижения погрешностей калибровки было предложено несколько возможных методов, приводимых далее в порядке повышения их точности.

Метод калибровки *по подвижному короткозамыкателю*, предложенный в [28] и отличающийся от традиционных тем, что в качестве опорного выбирается не произвольный зонд, а тот, что удовлетворяют заданному условию, после чего поочередно устанавливая определенные значения фазы подвижного короткозамыкателя и снимаются сигналы с датчиков. Однако, этот метод только несколько уменьшает систематические погрешности, потому что все равно величины $f_i(\rho, \varphi)$ вычисляются неточно, так как значение модуля ККО короткозамыкателя точно не известно.

Метод калибровки *по подвижной согласованной нагрузке*, предложенный в [29], заключается в получении избыточной системы калибровочных уравнений, когда вместо набора КО используется одна подвижная согласованная нагрузка. С датчиков МИЛ снимаются сигналы u_{ij} , при различных (неизвестных) значениях фазы согласованной нагрузки, которые составляют так называемую сигнальную матрицу $\mathbf{U} = \|u_{ij}\|$. В [22] показано, что при идеальном согласовании нагрузки с линией ($\rho_j = 0$) вектор коэффициентов передачи датчиков $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_N)^T$ может быть найден из выражения:

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = \mathbf{v},$$

где \mathbf{v} – собственный вектор размерности N , соответствующий максимальному собственному значению λ_{max} матрицы Грама $\mathbf{U}\mathbf{U}^T$. В результате случайные погрешности калибровки, обусловленные влиянием погрешностей ξ_{ij} , снижаются примерно в \sqrt{NM} раз.

Дополнительно можно уменьшить и систематические погрешности рассогласования подвижной «согласованной нагрузки», если выбирать определенные значения ее фаз, которые получены в цитируемой работе. Делается вывод, что данный метод показывает хорошие результаты, если имеется в наличии подвижная согласованная нагрузка с $KCB_H \leq 1,1$. В этом случае систематические погрешности калибровки из-за неидеального согласования становятся пренебрежимо малы по сравнению со случайными ошибками, вызванными влиянием погрешностей ξ_{ij} для типичных МИЛ, у которых отношение сигнал/шум на выходе датчиков составляет порядка 10^3 по мощности. Если же такой нагрузки нет (например, в условиях производственного цеха), то для точной калибровки МИЛ следует пользоваться более универсальным методом.

5. Калибровка МИЛ по набору нагрузок с неизвестными параметрами. В реальных условиях большинство пользователей автоматических измерительных систем на СВЧ имеют в наличии лишь ограниченное количество прецизионных калибровочных нагрузок, тем более, что данные системы могут применяться для измерения в широком диапазоне частот. Поэтому универсальная процедура калибровки предполагает, что используемые для нее нагрузки имеют не точно известные значения ККО (ρ_j, φ_j). Следовательно, при решении системы калибровочных уравнений МИЛ (8) все параметры ρ_j, φ_j, a_j , равно как и коэффициенты передачи датчиков α_i , считаются неизвестными, то есть она должна быть разрешена относительно $N+3M$ неизвестных параметров, и должно выполняться неравенство $N \cdot M \geq N+3 \cdot M$.

Решение (8) по ММП сводится к минимизации функции невязки [30]:

$$\varepsilon_0 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left\{ u_{ij} - \alpha_i a_j^2 [1 + \rho_j^2 + 2\rho_j \cos(\varphi_j - \psi_i)] \right\}^2. \quad (10)$$

Поиск минимума (10) проводится одним из известных градиентных методов безусловной минимизации нелинейных функций, что и было с успехом проделано в [31]. Однако подобные способы решения базируются на удачном выборе начального приближения для неизвестных параметров $\alpha_i, \rho_j, \varphi_j, a_j$. Необходимо указать такие их значения, которые будут находиться в зоне притяжения глобального минимума ε_0 , что является непростой задачей на практике. В работе [31] приводятся несколько способов нахождения начального приближения, но любой из них не может гарантировать, что найденное нулевое приближение окажется в зоне глобального минимума функции ε_0 .

Это заставило исследователей искать решение задачи калибровки МИЛ, также независимое от точности знания калибровочных нагрузок и позволяющее найти оценки искомым коэффициентам передачи зондов аналитически. Найденный способ калибровки основан на следующей системе калибровочных уравнений [22, 30]:

$$\mathbf{U} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{Q} + \mathbf{\Xi}. \quad (11)$$

Здесь ОМП оценки неизвестных параметров x_{im} и q_{mj} получаются в результате минимизации функции:

$$\varepsilon_0(\mathbf{X}, \mathbf{Q}) = \text{Tr}[(\mathbf{U} - \mathbf{XQ})^T \mathbf{P}(\mathbf{U} - \mathbf{XQ})], \quad (12)$$

где в (11) и (12) компонентами матрицы \mathbf{X} размера $(N \times 3)$ являются величины x_{im} , определяемые из (3), а компонентами матрицы \mathbf{Q} размера $(3 \times M) - q_{mj}$, задаваемые выражениями (9); Tr – оператор следа матрицы, $\mathbf{\Xi}$ – матрица погрешностей измерения ξ_{ij} .

Для минимизации (12) используется представление модели (11) в виде сепарабельных моделей, получаемых путем сингулярного разложения сигнальной матрицы \mathbf{U} [22, 30]. В результате решение получается из системы:

$$\mathbf{X} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{S}, \quad (13)$$

где \mathbf{W} – матрица размера $(N \times 3)$, столбцами которой являются собственные векторы матрицы Грама $\mathbf{U}\mathbf{U}^T$, соответствующие ее трем максимальным собственным числам; \mathbf{S} – матрица размера (3×3) неизвестных коэффициентов s_{ij} .

Так как интерес представляют только относительные коэффициенты передачи зондов α_i , то один произвольный коэффициент можно считать известным. Это дает возможность из (13) найти матрицу \mathbf{S} , после чего находится матрица \mathbf{X} , а из (3) получаются искомые оценки коэффициентов передачи α_i .

Таким образом, предлагаемый метод калибровки заключается в поочередном соединении к МИЛ M калибровочных нагрузок с неточно известными параметрами отражения из имеющегося набора, снятия сигналов u_{ij} с датчиков и представлении их в виде сигнальной матрицы \mathbf{U} размера $N \times M$. Далее формируется матрица Грама $\mathbf{U}\mathbf{U}^T$, находятся ее собственные значения, квадратные корни из которых суть сингулярные числа матрицы \mathbf{U} , и соответствующие им собственные векторы этой матрицы. Значения компонент выбранных собственных векторов подставляются в (13), из которой находятся оценки коэффициентов s_{kl} , составляющих \mathbf{S} , после чего ищутся оценки параметров x_{ij} , а из (3) – оценки искомых коэффициентов передачи датчиков α_i .

Сказанное означает, что можно точно калибровать МИЛ, не пользуясь никакими образцовыми нагрузками или другими эталонами отражения! Но не следует думать, что АСВ на основе МИЛ может быть откалиброван вообще без эталонов. Как видно из (3) и (13), значения фазовых набегов $\psi_i = 4\pi d_i/\lambda$ считаются точно известными, то есть известны расстояния от фланца подсоединения нагрузки до зондов и длина волны СВЧ-сигнала в МИЛ. Традиционные методы калибровки тоже считают их точно известными, поэтому предлагаемый статистический метод калибровки не заменяет одни эталоны другими, а пользуется меньшим числом эталонов. Это позволяет устранить один из основных источников систематических ошибок калибровки.

При расчете оценок параметров МИЛ x_{ik} параллельно из (11) вычисляются и параметры состояния q_{kj} . Следовательно, можно из (9) определить ККО неизвестных нагрузок, используемых при калибровке МИЛ. Значит, в этом случае калибровка МИЛ проводится параллельно с аттестацией калибровочных нагрузок. Этот факт можно использовать в производственных условиях [31], когда при измерении параметров большой партии изделий с помощью МИЛ не требуется предварительной калибровки установки.

6 Проектирование оптимальных АСВ на основе МИЛ. Проблематика повышения точности измерения методом МИЛ охватывает не только вопрос о точности оценивания совокупности величин, характеризуемых векторами \mathbf{c} или \mathbf{q} , но и выбор величин \mathbf{u} , обеспечивающих максимальную точность оценивания параметров измеряемых нагрузок. Задача в такой постановке тесно связана с проектированием оптимального измерителя, поскольку необходимо выбрать вектор \mathbf{u} , содержащий максимальное количество информации по Фишеру среди векторов заданного размера N .

Анализ получающихся ошибок вектора исследуемых параметров \mathbf{c} сложен из-за громоздкости получающихся выражений, поэтому чаще анализируются ошибки вектора состояния \mathbf{q} , когда оцениваются с максимальной точностью все его составляющие. В качестве скалярной характеристики точности рекомендуется выбрать обобщенную дисперсию вектора \mathbf{q} [22, 27, 32–34], совпадающую с детерминантом матрицы ошибок $\mathbf{D}[\mathbf{q}]$ (7). Планы эксперимента, доставляющие минимум детерминанту $\det[\mathbf{D}[\mathbf{q}]$, называются D -оптимальными.

Как видно из (5) и (7), элементы этой матрицы зависят от расстояний d_i от нагрузочной плоскости АА (рис. 2) до соответствующих датчиков, коэффициентов передачи зондов α_i и весовых коэффициентов p_i . На стадии проектирования величины α_i и p_i неизвестны. Поэтому оптимизацию выбора состава измерений проводят только подбором расстояний $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T$, то есть заданием подходящего расположения датчиков внутри тракта МИЛ. Иными словами, требуется так спланировать эксперимент, чтобы измерения \mathbf{u} содержали как можно больше информации по Фишеру, требуемой для оценивания с максимальной точностью вектора состояния \mathbf{q} системы ГИИО.

В зависимости от назначения АСВ проектировщики сталкиваются с двумя различными постановками задачи оптимизации его параметров. Если измеритель предназначен для работы в узком заданном диапазоне частот в окрестности центральной частоты f_0 , то оптимальное расположение датчиков МИЛ может быть найдено по критерию [27, 32–35]:

$$\mathbf{d}^* = \arg \left\{ \inf_{d_i \in \Psi} (\det |\mathbf{D}[\mathbf{q}]|) \right\}, \quad (14)$$

где \inf – обозначение точной нижней грани множества. При этом любое «оптимальное» расположение датчиков должно соответствовать физически реализуемой конструкции МИЛ ($d_i \in \Psi$). Использование критерия (14) позволяет конструировать измерители, обеспечивающие потенциально достижимую точность оценивания параметров \mathbf{q} в узком диапазоне частот, задаваемую нижней границей Крамера-Рао объема эллипсоида рассеяния ошибок оценивания [27, 32–34].

В работах [27, 32] показано, что критерию (14) удовлетворяет, например, следующее эквидистантное расположение датчиков на расстояниях:

$$\Delta d = \frac{kc}{2Nf_0},$$

где c – скорость распространения радиоволн в СВЧ-тракте МИЛ; k – натуральное число, но $N/2$ не кратно k . Расстояние d_1 до первого датчика может быть выбрано произвольным.

В частности, в работе [31] описана восьмизондовая МИЛ и представлена экспериментальная установка для исследования «холодных» параметров магнетронов микроволновых печей. Точность ее выше, чем требуемая для 1 класса в узкой полосе от 2,4 до 2,5 ГГц для нагрузок с КСВн $\leq 5,0$.

Но обычно АСВ используют для измерения в полосе частот, например, при определении резонансных параметров микроволновых нагрузок. Здесь критерий (14) должен быть видоизменен, так как в общем случае не существует таких расположений датчиков d_i , позволяющих получать совместно эффективные оценки составляющих вектора состояния \mathbf{q} во всем диапазоне. В этом случае теория рекомендует [27, 32–34] оптимизировать параметры МИЛ по критерию:

$$\mathbf{d}^* = \arg \left\{ \inf_{d_i \in \Psi} \sup_f [F(d_i, f, p_i)] \right\},$$

где f — текущая частота из фиксированного диапазона $f \in [f_{min}, f_{max}]$; \sup — обозначение точной верхней грани множества; $F(d_i, f, p_i)$ — функция эффективности оценок $\hat{\mathbf{q}}$ ($F(d_i, f, p_i) = \sqrt{|\mathbf{D}[\hat{\mathbf{q}}]|/\Delta_{min}}$), которая равна отношению объема эллипсоида рассеяния оценок для текущих значений d_i, p_i к минимальному объему эллипсоида при оптимальных значениях d_j^*, p_j^* для заданной частоты f из рассматриваемого диапазона $[f_{min}, f_{max}]$. Всегда $F(d_i, f, p_i) \geq 1$, а при достижении знака равенства оценка \mathbf{q} получается совместно эффективной.

Однако минимизировать такую многопараметрическую функцию значительно сложнее, чем (14). Поэтому искать решение и находить оптимальные расположения d_i можно только численными методами. Ввиду этого проектировщики МИЛ отказываются от концепции оптимальности и переходят к концепции достаточности, когда приемлемой считается любая стратегия, обеспечивающая значение показателя качества, не хуже заданного [27, 32–35]. Ввиду сказанного классический критерий (14) видоизменяется для обеспечения возможности его практической реализации на компьютере:

$$\mathbf{d}^* = \min_{d_i \in \Psi} \left\{ \max_{f \in [f_{min}, f_{max}]} [F(d_i, f, p_i)] \leq H_A \right\}, \quad (15)$$

где H_A – некоторая гарантированная граница точности оценивания параметров \mathbf{q} . Упомянутая концепция достаточности требует меньших затрат времени на поиск решения. Было предложено искать минимум (15) с помощью методов планирования оптимального эксперимента [22, 27].

На начальном этапе поиска [27, 33] эмпирически найдено приемлемое расположение датчиков, принимаемое за нулевое приближение решения:

$$d_i = d_1 + \sum_{m=0}^{i-1} \gamma_0 \beta^m,$$

где подбором коэффициента β достигается нужная ширина диапазона $[f_{min}, f_{max}]$, а изменением коэффициента γ_0 – смещение данного диапазона вдоль оси f . Далее оно улучшается в зависимости от требований к АСВ с помощью методов теории планирования эксперимента [22], когда в качестве оптимизируемого функционала выступает (15).

Основываясь на таком подходе, авторам работы [35] удалось создать макетный образец четырехзондового коаксиального АСВ, измеряющего с высокой точностью в диапазоне 6–18 ГГц. В работах [27, 32–34] разработаны МИЛ, в которых за счет расположения ограниченного числа зондов (не более 8) достигаются частотные диапазоны измерений шириной более 5 октав.

Но у МИЛ есть еще один важный резерв повышения точности измерения. После того, как было найдено приемлемое расположение датчиков и изготовлена соответствующая МИЛ, в процессе ее калибровки найденные значения коэффициентов передачи датчиков α_i могут изменить значения детерминанта (14) или функции эффективности $F(d_i, f, p_i)$ в большую сторону на некоторых частотах из заданного диапазона. Это ведет к увеличению погрешностей измерения.

Такое «паразитное» влияние коэффициентов передачи датчиков МИЛ может быть сведено к минимуму, если в процессе измерения сигналы, снимаемые с датчиков откалиброванной линии, учитывать с соответствующими весовыми коэффициентами. Как видно из (7) и (15) матрица ошибок вектора оценок параметров состояния $\hat{\mathbf{q}}$ и функция эффективности зависят от коэффициентов p_i . Поэтому можно так выбрать значения весов p_i , что дает возможность для любой частоты из рассматриваемого диапазона повысить точность измерения, приблизив ее к потенциально достижимой [27, 32–34].

Действительно, если все d_i и α_i заданы (после завершения калибровки), на произвольной частоте f из заданного диапазона матрица ошибок (7) не является диагональной. Но соответствующий подбор весов p_i позволяет обнулить все внедиагональные элементы этой матрицы. С этой целью следует при переходе на новую частоту f_m измерений из заданного диапазона рассчитать новые весовые коэффициенты, чтобы обнулить внедиагональные члены матрицы (7) (тогда ее детерминант будет наименьшим). Следовательно, функция эффективности становится практически равной единице $F(d_i, f, p_i) = 1$. Подобную процедуру можно легко реализовать, решая следующую систему:

$$\sum_{i=1}^N p_i \cos \psi_i = \sum_{i=1}^N p_i \sin \psi_i = \sum_{i=1}^N p_i \cos 2\psi_i = \sum_{i=1}^N p_i \sin 2\psi_i = 0$$

относительно неизвестных p_i .

Физический смысл учета весовых коэффициентов заключается в том, что надо увеличить вес у выходных сигналов тех датчиков, которые расположены вблизи пучностей стоячей волны, где отношение сигнал/шум максимальное, и уменьшить вес у сигналов с датчиков вблизи узлов стоячей волны при фиксированной частоте измерений f_m . Если число датчиков у МИЛ больше 4, то данная задача решается методами линейного программирования.

7 Анализ ошибок и неопределенностей измерения метода МИЛ. Все исследователи метода МИЛ анализировали получающиеся ошибки измерения ККО тестируемых нагрузок. К сожалению, если не используются оптимальные методы обработки сигналов с зондов линии (на начальных стадиях обработки сигналов проводятся нелинейные операции, например, нормировка сигналов на напряжение, снимаемое с одного из зондов), то проводить теоретический анализ погрешностей измерения очень сложно.

Теоретический анализ погрешностей МИЛ (случайных и систематических) был проведен только для оптимальных статистических методов обработки сигналов с выходов датчиков, в частности, для ММП. На основании анализа моделей МИЛ (1)–(4) в работах [22, 36, 37] показано, что основными источниками погрешностей МИЛ являются:

ξ_i – случайные ошибки измерения напряжения на датчиках, $\Delta\alpha_i$ – ошибки калибровки коэффициентов передачи детекторов датчиков, Δd_i – ошибки измерения расстояний от плоскости подсоединения нагрузки до датчиков, Δf – ошибка знания частоты сигнала в тракте МИЛ. При этом последние три источника считаются вносящими систематические погрешности. Относительно указанных ошибок делаются вполне обоснованные предположения, которые не противоречат реальным МИЛ:

1. Ошибки измерения ξ_i , $\Delta\alpha_i$, Δd_i и Δf независимы.
2. Ошибки $\Delta\alpha_i$, Δd_i и Δf – случайные величины, распределенные нормально с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями $\sigma_{\xi_i}^2$, $\sigma_{d_i}^2$ и σ_f^2 соответственно.

3. Ошибки ξ_i , $\Delta\alpha_i$, Δd_i и Δf достаточно малы, так что они приводят к малым погрешностям $\Delta\mathbf{q}$ и $\Delta\mathbf{c}$ в оценках векторов \mathbf{q} и \mathbf{c} , т.е. для норм векторов: $\|\Delta\mathbf{q}\| \ll \|\mathbf{q}\|$ и $\|\Delta\mathbf{c}\| \ll \|\mathbf{c}\|$.

В цитируемых работах получены матрицы ошибок (7) вектора состояния \mathbf{q} для каждого источника погрешностей в отдельности, причем для случая оптимальной расстановки датчиков МИЛ получены выражения для матриц ошибок вектора измеряемых параметров \mathbf{c} . Показано, что даже в случае оптимального расположения датчиков матрица ошибок вектора \mathbf{c} не является диагональной, то есть ошибки компонентов вектора измеряемых параметров перестают быть статистически независимыми.

В настоящее время, после принятия в России стандарта [38], часто для выражения точности измерения требуется использовать термин «неопределенность измерения» (например, такое требование предъявляется при аккредитации измерительных лабораторий).

В работах [39–43] на основе указанных выше предположений о характере источников неопределенности измерений подробно описаны результаты расчета ковариационных матриц, характеризующих неопределенность типа А (вызванную случайными источниками) и неопределенность типа В (вызванную источниками систематических погрешностей).

Методом статистического моделирования в работах [22, 36] получены зависимости дисперсий погрешностей случайных и систематических ошибок измерения, а в работах [39, 40, 43] – зависимости дисперсий неопределенностей измерения типа А и В для тех же источников ошибок. Полученные зависимости можно использовать при проектировании реальных МИЛ.

8. Дальнейшие перспективы метода МИЛ. Возможности метода МИЛ могут быть значительно расширены, если АСВ на ее основе использовать в комплексе с классическим МР. В работах [44, 45] была предложена интересная альтернатива – комбинированный многополюсный рефлектометр (КМР). Его структурная схема показана на рис. 3. Для упрощения конструкции КМР состоит из СВЧ-тракта, вдоль центральной продольной оси которого располагаются две группы датчиков одна группа имеет слабую связь с полем внутри тракта на известных расстояниях от фланца исследуемой нагрузки и может рассматриваться как МИЛ.

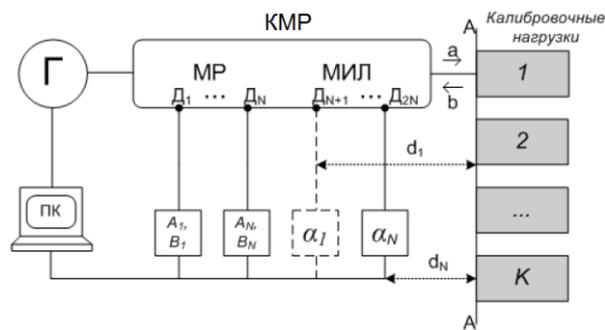


Рис. 3. Структурная схема ААЦ на основе КМР: Г – СВЧ-генератор, КМР – комбинированный многополюсный рефлектометр, МИЛ – многозондовая измерительная линия, МР – многополюсный рефлектометр, Д – датчики (зонды), ПК – персональный компьютер

Вторая группа датчиков, удаленная на некоторое расстояние от первой, чтобы не нарушать картины стоячей волны в МИЛ, имеет сильную связь с полем и описывается моделью классического МР. Такой измеритель достаточно прост в изготовлении и теоретически может быть откалиброван по набору нагрузок с неизвестными параметрами отражения. На самом деле, после подсоединения к измерителю набора этих нагрузок и снятия сигналов с зондов МИЛ и датчиков МР можно на первом этапе откалибровать коэффициенты передачи зондов МИЛ с параллельной аттестацией подсоединенных калибровочных нагрузок. Далее, используя найденные значения параметров отражения этих нагрузок, по ним откалибровать МР. Такой подход может значительно упростить измеритель и позволит его точную калибровку по набору неточно известных калибровочных средств, что может значительно расширить сферу применения анализаторов СВЧ-цепей на основе КМР.

Заключение. В работе дан подробный обзор методов измерения микроволновых нагрузок с помощью анализатора стоячей волны на основе МР, который может быть представлен в виде МИЛ. Сначала кратко описана история развития методов измерения с помощью традиционных МР и показано, что главной проблемой их использования является калибровка рефлектометра, которая может быть проведена точно только с использованием набора прецизионных калибровочных средств. Далее подробно исследована МИЛ, являющаяся частным случаем МР. Показано, что случайные ошибки измерения методом МИЛ выше, чем у точно откалиброванного МР. Однако МИЛ обладает важными достоинствами, которые обсуждаются в работе. Описана стратегия повышения точности измерения с помощью МИЛ:

- ◆ предложены оптимальные методы обработки выходных сигналов с зондов МИЛ по ММП;
- ◆ подробно исследованы методы калибровки датчиков МИЛ и показано, что подобный измеритель может быть откалиброван по набору неточно известных нагрузок с параллельной их аттестацией, что значительно снижает систематические ошибки калибровки;
- ◆ исследованы методы оптимизации конструкции МИЛ за счет расположения зондов для измерения с максимальной точностью в узком и широком диапазонах частот, а также показано, как можно измерять с потенциально достижимой точностью за счет надлежащего выбора весовых коэффициентов у зондов МИЛ.

Далее исследуются случайные и систематические ошибки измерения ККО СВЧ-нагрузок, а также неопределенности измерения типа А и В методом МИЛ и приводятся ссылки на соответствующие работы. В конце работы рассмотрены возможности совместного использования методов МИЛ и МР, кратко описан КМР, который измеряет с точностью, характерной для традиционного МР, но может быть откалиброван по набору неизвестных нагрузок, что свойственно методу МИЛ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-29-00879.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Nikolaenko A.Yu., L'vov A.A., Komarov V.V., Ivzhenko S.P., L'vov P.A.* Analysis of Modern Techniques for Automatic Measurements in Microwaves // Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2016. – P. 960-964.
2. *Гунта К., Гардж Р., Чадха Р.* Машинное проектирование СВЧ устройств. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.
3. *Ануфриев А.* Технологии компании Keysight Technologies на российском предприятии – первый опыт // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2016. – Вып. 2. – С. 86-87.
4. *Engen G.F., Hoer C.A.* Application of an Arbitrary Six-Port Junction to Power Measurement Problems // IEEE Trans. on Instrum. and Meas. – 1972. – Vol. 21, No. 5. – P. 470-474.
5. *Hoer C.A.* The Six-Port Coupler: A New Approach to Measuring Voltage, Current, Power, Impedance, and Phase // IEEE Trans. on Instrum. and Meas. – 1972. – Vol. IM-21, No. 11. – P. 466-470.

6. *Hanson E.R.B., Riblet G.P.* An Ideal Six-Port Network Consisting of a Matched Reciprocal Lossless Five-Port and a Perfect Directional Coupler // *IEEE Trans. of Microwave Theory and Tech.* – 1983. – Vol. MTT-31, No. 3. – P. 284-288.
7. *Hunter J.D., Somlo P.I.* Simple Derivation of Six-Port Reflectometer Equations // *Electronic Letters.* – 1985. – Vol. 21, No. 4. – P. 370-371.
8. *Петров В.П., Рясный Ю.В., Журавлева О.Б.* Многополюсные измерительные преобразователи анализаторов цепей на СВЧ // *Измерительная техника.* – 1987. – № 3. – С. 41-43.
9. *Никулин С.М., Салов А.Н.* Применение двенадцатиполусных рефлектометров в технике СВЧ-измерений // *Радиотехника.* – 1987. – № 7. – С. 70-72.
10. *Somlo P.I.* The Case for Using a Matched Load Standard for Six-Port Calibration // *Electronic Letters.* – 1983. – Vol. 19, No. 11. – P. 979-980.
11. *Li S., Bosisio R.G.* Calibration of Multiport Reflectometers by Means of Four Open Short Circuits // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.* – 1982. – Vol. MTT-30, No. 7. – P. 1085-1090.
12. *Никулин С.М., Салов А.Н.* Метод калибровки автоматических анализаторов СВЧ цепей с двенадцатиполусными рефлектометрами // *Измерительная техника.* – 1988. – № 8. – С. 43-45.
13. *Xiao F., Ghannouchi F.M., Yakabe T.* Application of a Six-Port Wave-Correlator for a Very Low Velocity Measurement Using the Doppler Effect // *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.* – 2003. – Vol. 52, No. 2. – P. 546-554.
14. *Ghannouchi F.M., Mohammadi A.* The six-port technique with microwave and wireless applications. – Boston, London: Artech House, 2009.
15. *Hasan A., Helaoui M.* Novel Modeling and Calibration Approach for Multi-Port Receivers Mitigating System Imperfections and Hardware Impairments // *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.* – 2012. – Vol. 60, No. 8. – P. 2644-2653.
16. *Львов П.А.* Применение многополюсных рефлектометров специального вида для решения ряда прикладных задач // *Вестник Саратовского государственного технического университета.* – 2010. – № 2 (45). – С. 181-193.
17. *Caldecott R.* The Generalized Multiprobe Reflectometer and Its Application to Automated Transmission Line Measurements // *IEEE Trans. on Antennas and Propagation.* – 1973. – Vol. AP-21, No. 4. – P. 550-554.
18. А.с. № 1133564 Кл. G01R 27/06. Устройство для измерения модуля и фазы коэффициента отражения в СВЧ трактах / *Румянцев Ю.Б., Гайдаров А.С.* Оpub. в БИ № 1, 1985.
19. *Бондаренко И.К., Гимпилевич Ю.Б., Царик Ю.И.* Автоматический анализатор цепей многоэлементного типа и методы его калибровки // *Измерительная техника.* – 1985. – № 10. – С. 33-34.
20. *Зебек С.Е., Гимпилевич Ю.Б.* Автоматический измеритель комплексного коэффициента отражения на основе квадратурного метода // *Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций.* – 2018. – № 1. – С. 128.
21. *Колотыгин С.А., Маневич В.З.* Погрешность измерений на СВЧ многозондовым преобразователем проходного типа // *Исследования в области прецизионных радиотехнических измерений: Сб. научных трудов.* – М.: ВНИИФТРИ, 1987. – С. 10-19.
22. *Львов А.А.* Методология повышения точности автоматических СВЧ-измерителей на основе статистического анализа нелинейных моделей: дисс. ... докт. техн. наук. – Саратов, 2002. – 370 с.
23. *Львов А.А., Мещанов В.П., Светлов М.С.* Оптимальное оценивание параметров СВЧ-цепей с помощью автоматических анализаторов цепей. Общая постановка задачи // *Радиотехника.* – 2016. – № 10. – С. 240-244.
24. *Линник Ю.В.* Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 334 с.
25. *Львов А.А., Моржаков А.А., Шишин С.И., Жуков А.В., Кудряшов Ю.Ю.* Измерение параметров СВЧ-двухполюсников путем многозондовой измерительной линии // *Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ.* – 1987. – Вып. 7 (401). – С. 48-51.
26. *Львов А.А., Мещанов В.П., Светлов М.С., Николаенко А.Ю.* Оптимальное оценивание параметров СВЧ-цепей с помощью автоматических анализаторов цепей. Алгоритмы обработки наблюдаемых данных // *Радиотехника.* – 2018. – № 8. – С. 147-154.
27. *Львов А.А., Мещанов В.П., Светлов М.С., Семезев Н.* Оптимальное оценивание параметров СВЧ-цепей с помощью автоматических многополюсных анализаторов. Выбор оптимального состава измерений // *Радиотехника.* – 2019. – № 7 (10). – С. 101-111.
28. Патент РФ № 1555682 кл. G01R 27/06. Способ калибровки коэффициентов передачи многозондовой измерительной линии / *Андрянов В.А., Кудряшов Ю.Ю., Львов А.А., Моржаков А.А.* Оpub. в Б.И. № 17, 07.04.90.
29. А.с. № 1700504 кл. G01R 35/00. Способ калибровки коэффициентов передачи датчиков многозондовой измерительной линии / *Львов А.А., Моржаков А.А., Кудряшов Ю.Ю., Лихоманов А.Ю.* Оpub. в Б.И. № 48, 23.12.91.

30. Львов А.А., Моржаков А.А., Шириин С.И., Жуков А.В., Кудряшов Ю.Ю. Автоматизированная система измерения СВЧ-параметров генераторов для бытовых микроволновых печей // Электронная техника. Сер. 8: Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. – 1989. – Вып. 5 (137). – С. 50-53.
31. Львов А.А., Семёнов К.В. Метод калибровки автоматической многозондовой измерительной линии // Измерительная техника. – 1999. – № 4. – С. 34-39.
32. Кудряшов Ю.Ю., Львов А.А., Моржаков А.А., Шириин С.И. Оптимизация параметров многозондовой измерительной линии // Электронная техника, 1988. Сер. 1. Электроника СВЧ. – Вып. 14 (414). – С. 30-34.
33. L'vov A.A., Geranin R.V., Semezhev N., L'vov P.A. Statistical Approach to Measurements with Microwave Multi-Port Reflectometer and Optimization of Its Construction // Proc. of Microwave and Radio Electronics Week, 14th Conf. on Microwave Techniques. – Pardubice, Czech Republic: IEEE, 2015. – P. 179-183. – DOI: 10.1109/COMITE.2015.7120229.
34. L'vov A.A., Galkina S.A., Anufriev A.N. Design of wideband automatic network analyzers based on the multi-port reflectometer // Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia: IEEE, 2016. – P. 416-423. – DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879038.
35. Katz B.M., L'vov A.A., Meschanov V.P., Shatalov E.M., Shilova L.V. Synthesis of a Wideband Multiprobe Reflectometer // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2008. – Vol. 56, No. 2. – P. 507-514.
36. Львов А.А., Моржаков А.А., Жуков А.В. Статистический анализ точностных характеристик метода многозондовой измерительной линии // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1990. – Вып. 1 (425). – С. 50-57.
37. L'vov A.A., Morzhakov A.A. Statistical Estimation of the Complex Reflection Coefficient of Microwave Loads Using a Multi-Port Reflectometer // Proc. of 1995 SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronics Conf. – Rio-de-Janeiro, Brazil: IEEE, 1995. – P. 235-239.
38. ГОСТ R 54500.1—2011/Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009. Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководство по неопределённости измерения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 24 с.
39. Solopekina A.A., L'vov A.A., Semezhev N. Calculation of measurement uncertainties of multi-port transmission line reflectometer // Proc. of 2014 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia: IEEE, 2014. – P. 356-362. DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958776.
40. Солопекина А.А., Львов А.А., Семежев Н. Расчет неопределенностей измерения характеристик многозондовой измерительной линии // Компьютерные науки и информационные технологии: Матер. Междунар. науч. конф. – Саратов: Изд-во центр «Наука», 2016. – С. 396-400.
41. Solopekina A.A., Semezhev N., L'vov A.A., Komarov V.V., Svetlov M.S. Application of the Uncertainty Method for Analysis of Multi-Port Correlator Accuracy // Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2017. – P. 505-509.
42. Солопекина А.А., Львов, А.А., Семежев Н., Вагарина Н.С. Применение метода неопределенности для анализа погрешностей многополюсного рефлектометра // Надежность и качество: Сб. трудов. Междунар. симп.: в 2 т. Т. 2. – Пенза: ПГУ, 2017. – С. 136-139.
43. Львов А.А., Семежев Н., Солопекина А.А., Глухова О.М. Анализ модели многозондовой измерительной линии и расчет неопределенностей измерения с ее помощью // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 4. – С. 141-151.
44. Львов А.А. Автоматический измеритель параметров СВЧ двухполюсников на основе многополюсника // Измерительная техника. – 1996. – № 2. – С. 10-12.
45. L'vov A.A., Nikolaenko A.Yu., L'vov P.A. A Novel Vector Network Analyzer Using Combined Multi-Port Reflectometer // Proc. of Microwave and Radio Electronics Week, 14th Conf. on Microwave Techniques. – Pardubice, Czech Republic: IEEE, 2015. – P. 183-187. – DOI: 10.1109/COMITE.2015.7120230.

REFERENCES

1. Nikolaenko A.Yu., L'vov A.A., Komarov V.V., Ivzhenko S.P., L'vov P.A. Analysis of Modern Techniques for Automatic Measurements in Microwaves, Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. St. Petersburg, Russia: IEEE, 2016, pp. 960-964.
2. Gupta K., Gardzh R., Chadkha R. Mashinnoe proektirovanie SVCh ustroystv [Machine design of microwave devices]. M.: Radio i svyaz', 1987, 432 p.
3. Anufriev A. Tekhnologii kompanii Keysight Technologies na rossiyskom predpriyatii – pervyy opyt [Keysight Technologies at Russian enterprise – first experience], Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes [Electronics. Science. Technologies. Business], 2016, Issue 2, pp. 86-87.
4. Engen G.F., Hoer C.A. Application of an Arbitrary Six-Port Junction to Power Measurement Problems, IEEE Trans. on Instrum. and Meas., 1972, Vol. 21, No. 5, pp. 470-474.

5. Hoer C.A. The Six-Port Coupler: A New Approach to Measuring Voltage, Current, Power, Impedance, and Phase, *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.*, 1972, Vol. IM-21, No. 11, pp. 466-470.
6. Hanson E.R.B., Riblet G.P. An Ideal Six-Port Network Consisting of a Matched Reciprocal Lossless Five-Port and a Perfect Directional Coupler, *IEEE Trans. of Microwave Theory and Tech.*, 1983, Vol. MTT-31, No. 3, pp. 284-288.
7. Hunter J.D., Somlo P.I. Simple Derivation of Six-Port Reflectometer Equations, *Electronic Letters*, 1985, Vol. 21, No. 4, pp. 370-371.
8. Petrov V.P., Rysnyy Yu.V., Zhuravleva O.B. Mnogopolyusnye izmeritel'nye preobrazovateli analizatorov tsepey na SVCh [Multi-pole measuring converters of microwave network analyzers], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 1987, No. 3, pp. 41-43.
9. Nikulin S.M., Salov A.N. Primenenie dvenadsatipolyusnykh reflektometrov v tekhnike SVCh-izmereniy [Application of twelve-pole reflectometers in microwave measurement technology], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 1987, No. 7, pp. 70-72.
10. Somlo P.I. The Case for Using a Matched Load Standard for Six-Port Calibration, *Electronic Letters*, 1983, Vol. 19, No. 11, pp. 979-980.
11. Li S., Bosisio R.G. Calibration of Multiport Reflectometers by Means of Four Open Short Circuits, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, 1982, Vol. MTT-30, No. 7, pp. 1085-1090.
12. Nikulin S.M., Salov A.N. Metod kalibrovki avtomaticheskikh analizatorov SVCh tsepey s dvenadsatipolyusnymi reflektometrami [Method of calibration of automatic analyzers of microwave circuits with twelve-pole reflectometers], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 1988, No. 8, pp. 43-45.
13. Xiao F., Ghannouchi F.M., Yakabe T. Application of a Six-Port Wave-Correlator for a Very Low Velocity Measurement Using the Doppler Effect, *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.*, 2003, Vol. 52, No. 2, pp. 546-554.
14. Ghannouchi F.M., Mohammadi A. The six-port technique with microwave and wireless applications. Boston, London: Artech House, 2009.
15. Hasan A., Helaoui M. Novel Modeling and Calibration Approach for Multi-Port Receivers Mitigating System Imperfections and Hardware Impairments, *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, 2012, Vol. 60, No. 8, pp. 2644-2653.
16. L'vov P.A. Primenenie mnogopolyusnykh reflektometrov spetsial'nogo vida dlya resheniya ryada prikladnykh zadach [Application of multi-pole reflectometers of a special type for solving a number of applied problems], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2010, No. 2 (45), pp. 181-193.
17. Caldecott R. The Generalized Multiprobe Reflectometer and Its Application to Automated Transmission Line Measurements, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1973, Vol. AP-21, No. 4, pp. 550-554.
18. Rumyantsev Yu.B., Gaydarov A.S. A.s. № 1133564 Kl. G01R 27/06. Ustroystvo dlya izmereniya modulya i fazy koeffitsienta otrazheniya v SVCh traktakh [Author's certificate No. 1133564, Class G01R 27/06. Device for measuring the modulus and phase of the reflection coefficient in microwave paths]. Published in the Bulletin of inventions, 1985, No. 1.
19. Bondarenko I.K., Gimpilevich Yu.B., TSarik Yu.I. Avtomaticheskii analizator tsepey mnogoelementnogo tipa i metody ego kalibrovki [Automatic analyzer of multi-element circuits and methods of its calibration], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 1985, No. 10, pp. 33-34.
20. Zebek S.E., Gimpilevich Yu.B. Avtomaticheskii izmeritel' kompleksnogo koeffitsienta otrazheniya na osnove kvadraturного метода [Automatic meter of complex reflection coefficient based on the quadrature method], *Sovremennye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy* [Modern problems of radio electronics and telecommunications], 2018, No. 1, pp. 128.
21. Kolotygin S.A., Manevich V.Z. Pogreshnost' izmereniy na SVCH mnogozondovym preobrazovatelem prokhodnogo tipa [Error of measurements at microwave frequencies by a multi-probe feed-through converter], *Issledovaniya v oblasti pretsizionnykh radiotekhnicheskikh izmereniy: Sb. nauchnykh trudov* [Research in the field of precision radio engineering measurements: Collection of scientific papers]. Moscow: VNIIFTRI, 1987, pp. 10-19.
22. L'vov A.A. Metodologiya povysheniya tochnosti avtomaticheskikh SVCh-izmeriteley na osnove statisticheskogo analiza nelineynykh modeley: disc. ... dokt. tekhn. nauk [Methodology for improving the accuracy of automatic microwave meters based on statistical analysis of nonlinear models: dr. of eng. sc. diss.]. Saratov, 2002, 370 p.
23. L'vov A.A., Meshchanov V.P., Svetlov M.S. Optimal'noe otsenivanie parametrov SVCh-tsepey s pomoshch'yu avtomaticheskikh analizatorov tsepey. Obschchaya postanovka zadachi [Optimal estimation of microwave circuit parameters using automatic circuit analyzers. General statement of the problem], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2016, No. 10, pp. 240-244.

24. Linnik Yu.V. Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudeniy [Least squares method and fundamentals of the theory of observation processing]. Moscow: GIFML, 1958, 334 p.
25. L'vov A.A., Morzhakov A.A., Shirshin S.I., Zhukov A.V., Kudryashov Yu.Yu. Izmerenie parametrov SVCh-dvukhpolyusnikov putem mnogozondovoy izmeritel'noy linii [Measuring parameters of microwave two-terminal networks by means of a multi-probe measuring line], *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1: Elektronika SVCh* [Electronic engineering. Ser. 1: Microwave electronics], 1987, Issue 7 (401), pp. 48-51.
26. L'vov A.A., Meshchanov V.P., Svetlov M.S., Nikolaenko A.Yu. Optimal'noe otsenivanie parametrov SVCh-tsepey s pomoshch'yu avtomaticheskikh analizatorov tsepey. Algoritmy obrabotki nablyudaemykh dannykh [Optimal estimation of microwave circuit parameters using automatic network analyzers. Algorithms for processing observed data], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2018, No. 8, pp. 147-154.
27. L'vov A.A., Meshchanov V.P., Svetlov M.S., Semezhev N. Optimal'noe otsenivanie parametrov SVCh-tsepey s pomoshch'yu avtomaticheskikh mnogopolyusnykh analizatorov. Vybor optimal'nogo sostava izmereniy [Optimal estimation of microwave circuit parameters using automatic multi-pole analyzers. Selection of the optimal composition of measurements], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2019, No. 7 (10), pp. 101-111.
28. Andriyanov V.A., Kudryashov Yu.Yu., L'vov A.A., Morzhakov A.A. Patent RF № 1555682 kl. G01R 27/06. Sposob kalibrovki koeffitsientov peredachi mnogozondovoy izmeritel'noy linii [Patent of the Russian Federation No. 1555682 class G01R 27/06. Method for calibrating the transmission coefficients of a multi-probe measuring line]. Published in the Bulletin of inventions, 1990, No. 17..
29. L'vov A.A., Morzhakov A.A., Kudryashov Yu.Yu., Likhomanov A.Yu. A.s. № 1700504 kl. G01R 35/00. Sposob kalibrovki koeffitsientov peredachi datchikov mnogozondovoy izmeritel'noy linii [Author's certificate No. 1700504, Class G01R 35/00. Method for calibrating the transmission coefficients of a multi-probe measuring line]. Opubl. v B.I. № 48, 23.12.91. Published in the Bulletin of inventions, 1991, No. 48.
30. L'vov A.A., Morzhakov A.A., Shirshin S.I., Zhukov A.V., Kudryashov Yu.Yu. Avtomatizirovannaya sistema izmereniya SVCh-parametrov generatorov dlya bytovykh mikrovolnovykh pechey [Automated system for measuring microwave parameters of generators for household microwave ovens], *Elektronnaya tekhnika. Ser. 8: Upravlenie kachestvom, standartizatsiya, metrologiya, ispytaniya* [Electronic engineering. Series 8: Quality management, standardization, metrology, testing], 1989, Issue 5 (137), pp. 50-53.
31. L'vov A.A., Semenov K.V. Metod kalibrovki avtomaticheskoy mnogozondovoy izmeritel'noy linii [Calibration method of automatic multi-probe measuring line], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring engineering], 1999, No. 4, pp. 34-39.
32. Kudryashov Yu.Yu., L'vov A.A., Morzhakov A.A., Shirshin S.I. Optimizatsiya parametrov mnogozondovoy izmeritel'noy linii [Optimization of parameters of a multi-probe measuring line], *Elektronnaya tekhnika, Ser. 1. Elektronika SVCh* [Electronic Engineering. Series 1. Microwave Electronics], 1988, Issue 14 (414), pp. 30-34.
33. L'vov A.A., Geranin R.V., Semezhev N., L'vov P.A. Statistical Approach to Measurements with Microwave Multi-Port Reflectometer and Optimization of Its Construction, Proc. of Microwave and Radio Electronics Week, 14th Conf. on Microwave Techniques. Pardubice, Czech Republic: IEEE, 2015, pp. 179-183. DOI: 10.1109/COMITE.2015.7120229.
34. L'vov A.A., Galkina S.A., Anufriev A.N. Design of wideband automatic network analyzers based on the multi-port reflectometer, *Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, Russia: IEEE, 2016, P. 416-423. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879038.
35. Katz B.M., L'vov A.A., Meshchanov V.P., Shatalov E.M., Shilova L.V. Synthesis of a Wideband Multiprobe Reflectometer, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, Vol. 56, No. 2, pp. 507-514.
36. L'vov A.A., Morzhakov A.A., Zhukov A.V. Statisticheskii analiz tochnostnykh kharakteristik metoda mnogozondovoy izmeritel'noy linii [Statistical analysis of accuracy characteristics of the multi-probe measuring line method], *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh* [Electronic engineering. Ser. 1. Microwave electronics], 1990, Issue 1 (425), pp. 50-57.
37. L'vov A.A., Morzhakov A.A. Statistical Estimation of the Complex Reflection Coefficient of Microwave Loads Using a Multi-Port Reflectometer, *Proc. of 1995 SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronics Conf.* Rio-de-Janeiro, Brazil: IEEE, 1995, pp. 235-239.
38. GOST R 54500.1—2011/Rukovodstvo ISO/MEK 98-1:2009. Neopredelennost' izmereniya. Chast' 1. Vvedenie v rukovodstva po neopredelennosti izmereniya [GOST R 54500.1—2011/ISO/IEC Guide 98-1:2009. Uncertainty of measurement. Part 1. Introduction to guides on uncertainty of measurement]. Moscow: Standartinform, 2012, 24 p.

39. Solopekina A.A., L'vov A.A., Semezhev N. Calculation of measurement uncertainties of multi-port transmission line reflectometer, *Proc. of 2014 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, Russia: IEEE, 2014, pp. 356-362. DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958776.
40. Solopekina A.A., L'vov A.A., Semezhev N. Raschet neopredelennostey izmereniya kharakteristik mnogozondovoy izmeritel'noy linii [Calculation of uncertainties in measuring the characteristics of a multi-probe measuring line], *Komp'yuternye nauki i informatsionnye tekhnologii: Mater. Mezhdunar. nauch. konf.* [Computer science and information technology: Proceedings of the International scientific conference]. Saratov: Izdat. tsentr «Nauka», 2016, pp. 396-400.
41. Solopekina A.A., Semezhev N., L'vov A.A., Komarov V.V., Svetlov M.S. Application of the Uncertainty Method for Analysis of Multi-Port Correlator Accuracy, *Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.* St. Petersburg, Russia: IEEE, 2017, pp. 505-509.
42. Solopekina A.A., L'vov, A.A., Semezhev N., Vagarina N.S. Primenenie metoda neopredelennosti dlya analiza pogreshnostey mnogopolyusnogo reflektometra [Application of the uncertainty method to analyze the errors of a multi-pole reflectometer], *Nadezhnost' i kachestvo: Sb. trudov. Mezhdunar. simp. [Reliability and quality: Collection of papers. International symposium]: in 2 vol. Vol. 2. Penza: PGU, 2017, pp. 136-139.*
43. L'vov A.A., Semezhev N., Solopekina A.A., Glukhova O.M. Analiz modeli mnogozondovoy izmeritel'noy linii i raschet neopredelennostey izmereniya s ee pomoshch'yu [Analysis of the model of a multi-probe measuring line and calculation of measurement uncertainties with its help], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, computing and informatics], 2019, No. 4, pp. 141-151.
44. L'vov A.A. Avtomaticheskiiy izmeritel' parametrov SVCH dvukhpolyusnikov na osnove mnogopolyusnika [Automatic meter of microwave parameters of two-terminal networks based on a multi-terminal network], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 1996, No. 2, pp. 10-12.
45. L'vov A.A., Nikolaenko A.Yu., L'vov P.A. A Novel Vector Network Analyzer Using Combined Multi-Port Reflectometer, *Proc. of Microwave and Radio Electronics Week, 14th Conf. on Microwave Techniques*. Pardubice, Czech Republic: IEEE, 2015, pp. 183-187. DOI: 10.1109/COMITE.2015.7120230.

Львов Алексей Арленович – Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; e-mail: alvova@mail.ru; г. Саратов, Россия; тел.: +79172015675; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации».

Кац Борис Маркович – «Научно-производственное предприятие «НИКА-СВЧ»; e-mail: brs19520@yandex.ru; г. Саратов, Россия; тел. +79053260149; к.ф.-м.н.; начальник отдела перспективных исследований.

Львов Петр Алексеевич – e-mail: peter.lvov@gmail.com; тел.: +79173230567; к.т.н.; в.н.с.

Мещанов Валерий Петрович – e-mail: nika373@bk.ru; тел.: +79172124626; д.ф.-м.н.; профессор; директор.

Саяпин Кирилл Александрович – e-mail: sayapin.k.a@mail.ru; тел.: +79053234081; к.ф.-м.н.; в.н.с.

L'vov Alexey Arlenovich – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: alvova@mail.ru; Saratov, Russia; phone: +79172015675; dr. of eng. sc.; professor; head of the Department “Radio-electronics and Telecommunications”.

Kats Boris Markovich – NPP “NIKA MICROWAVES”; e-mail: brs19520@yandex.ru; Saratov, Russia; phone: +79053260149; cand. of phys.-mat. sc.; head of the Department of prospective researches.

L'vov Petr Alekseevich – e-mail: peter.lvov@gmail.com; phone: +79173230567; cand. of eng. sc.; leading researcher.

Meschanov Valeriy Petrovich – e-mail: nika373@bk.ru; phone: +79172124626; dr. of phys.-mat. sc.; professor; enterprise head.

Sayapin Kirill Alexandrovich – e-mail: sayapin.k.a@mail.ru; phone: +79053234081; cand. of phys.-mat. sc.; leading researcher.

Раздел IV. Нанотехнологии, электроника и радиотехника

УДК 621.3.049.774.2:621.396.67

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-248-256

Б.Г. Коноплев

МОДЕЛЬ РЕКТЕННЫ НА ОСНОВЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ СОБИРАНИЯ СВЧ ЭНЕРГИИ ПРИ СВЕРХНИЗКИХ УРОВНЯХ МОЩНОСТИ

Для беспроводного и безбатарейного питания автономных приборов с малой потребляемой мощностью все шире применяется собирание радиочастотной энергии из окружающей среды: энергии излучения станций сотовой связи, радиотелевизионных станций, СВЧ-печей, Wi-Fi, Bluetooth и др. источников. Для преобразования собранной энергии в напряжение питания постоянного тока применяются устройства, состоящие из антенны, выпрямителя и схемы согласования импедансов антенны и выпрямителя, называемые ректеннами. При собирании энергии из окружающей среды плотность мощности электромагнитного поля может быть весьма малой: от сотен микроватт до десятков пиковатт на см². Поэтому актуальной является задача разработки ректенн, способных работать при сверхнизких уровнях мощности. Параметры составляющих ректенны (антенны, схемы согласования импедансов, выпрямителя) сильно связаны между собой, поэтому для получения оптимальных характеристик необходимо выполнять проектирование ректенны с учетом взаимовлияния всех составляющих и использовать соответствующие модели. В работе выполнен анализ особенностей построения и разработка модели ректенны на основе МОП-транзисторов для работы при сверхнизких уровнях мощности в составе автономных устройств с беспроводным питанием. Получены выражения для оценки выходного напряжения ректенны с учетом основных параметров антенны, выпрямителя/умножителя напряжения и устройства согласования импедансов. Выполнены расчеты по полученным выражениям и моделирование для типовой КМОП-технологии 90 нм. Показана возможность построения ректенн на основе МОП-транзисторов при сверхнизких мощностях вплоть до -50 дБм. Даны рекомендации по выбору технологических и конструктивных параметров ректенн для собирания СВЧ энергии.

Собирание СВЧ энергии из окружающей среды; ректенны; нанометровые МОП-транзисторы; подпороговый режим; модель ректенны.

B.G. Konoplev

A RECTENNA MODEL BASED ON MOSFETS FOR MICROWAVE ENERGY HARVESTING AT ULTRA-LOW POWER LEVELS

For wireless and battery-free power supply of autonomous devices with low power consumption harvesting of radio frequency energy from the environment is increasingly used: energy from cellular stations, radio stations, microwave ovens, Wi-Fi, Bluetooth, etc. To convert the collected energy into a DC voltage, devices consisting of an antenna, a rectifier and an impedance matching circuit of the antenna and the rectifier, called rectennas, are used. The power density of the electromagnetic field can be very small: from hundreds of microwatts to tens of picowatts per cm². Therefore, the task of developing rectennas capable of operating at ultra-low power levels is urgent. The parameters of components of the rectenna (antenna, impedance matching circuit, rectifier) are strongly interconnected, therefore, to obtain optimal characteristics, it is necessary to design the rectenna considering the mutual influence of all components and use appropriate models. The paper analyzes the features of the construction and development of a rectenna model based on MOSFETs for operation at ultra-low power levels. Expressions for estimating the output voltage of the rectenna are obtained, considering the basic parameters of the antenna, the rectifier/voltage multiplier and the impedance matching circuit. Calculations based on the obtained expressions and modeling are performed for a typical 90 nm CMOS technology. The possibility of constructing rectennas based on MOSFETs at ultra-low power levels up to -50 dBm is shown. Recommendations are given on the choice of technological and design parameters of rectennas for harvesting microwave energy.

Harvesting microwave energy from the environment; rectenna; nanometer MOSFET; subthreshold mode; rectenna model.

Введение. Для беспроводного и безбатарейного питания автономных приборов с малой потребляемой мощностью все шире применяется собирание радиочастотной энергии из окружающей среды (Energy Harvesting): энергии излучения станций сотовой связи, радиотелевизионных станций, СВЧ-печей, Wi-Fi, Bluetooth и др. источников [1–5].

Для преобразования радиочастотной энергии в напряжение питания постоянного тока применяются устройства, состоящие из антенны, выпрямителя и схемы согласования импедансов антенны и выпрямителя, называемые ректеннами (сокращение от rectifier&antenna) [6–8].

При использовании в автономных сенсорных сетях, метках радиочастотной идентификации (RFID) и других миниатюрных устройствах определяющим требованием является радикальное уменьшение размеров ректенн, что ведет к необходимости выполнения их в виде интегральных конструкций по полупроводниковой или гибридной технологии. Другим важнейшим требованием является снижение стоимости приборов при массовом производстве. Эти факторы обусловили выполнение антенной части и согласующих схем ректенн на основе печатной, тонко- или толсто пленочной технологии, а выпрямителей – по хорошо отработанной полупроводниковой технологии (обычно КМОП), совместимой с устройствами обработки информации [2, 9–11].

При собирании СВЧ энергии для питания приборов из окружающей среды плотность мощности электромагнитного поля может быть весьма малой: от сотен микроватт до десятков пиковатт на см^2 [3, 11–14]. Поэтому актуальной является задача разработки ректенн, способных работать при сверхнизких уровнях мощности.

Параметры всех составляющих ректенны (антенны, схемы согласования импедансов, выпрямителя) сильно связаны между собой, поэтому для получения оптимальных характеристик необходимо выполнять проектирование ректенны как интегрального узла с учетом взаимовлияния всех составляющих и использовать соответствующие модели [2, 5].

Целью исследования является анализ особенностей построения и разработка модели ректенны на основе МОП-транзисторов для работы при сверхнизких уровнях мощности в составе автономных устройств с беспроводным питанием.

Ректенны на основе МОП-транзисторов при сверхнизких уровнях мощности.

Упрощенная схема ректенны показана на рис. 1 [7, 15].

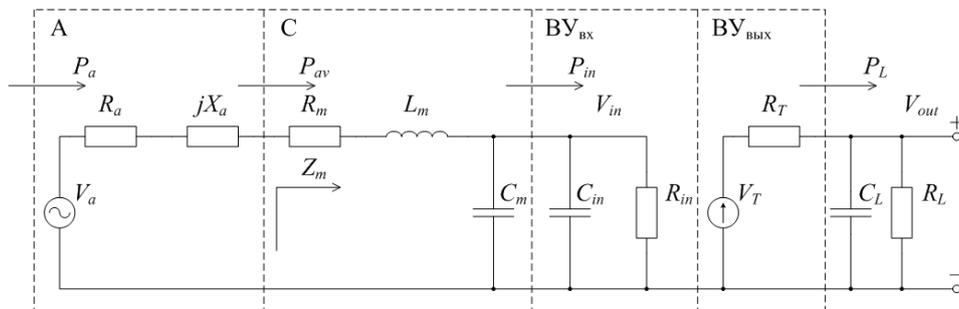


Рис. 1. Упрощенная схема ректенны: А – антенна; С- схема согласования; ВUвх, ВUвых – выпрямитель/умножитель напряжения

Эквивалентная схема антенны А включает источник высокочастотного напряжения с амплитудой V_a и сопротивление антенны, состоящей из активной R_a и реактивной jX_a частей. Принятый антенной сигнал подается на выпрямитель/умножитель напряжения ВU через схему согласования импедансов С. Входной импеданс ВU представлен емкостями C_{in} , C_m и сопротивлением R_{in} . Нагрузкой ректенны в схеме служат резистор R_L и конденсатор C_L . Собранная из внешней среды энергия накапливается на конденсаторе C_L пока выпрямленное напряжение V_{out} на нём не достигнет достаточного уровня, при котором возможна активная работа микросистемы (например, получение, обработка и передача данных).

Для повышения чувствительности применяют многокаскадные выпрямители/умножители напряжения на МОП-транзисторах в диодном включении, схема которого приведена на рис. 2 [16]. В схеме ректенны (см. рис. 1) выпрямитель/умножитель напряжения представлен в виде его входной $V_{Uвх}$ и выходной $V_{Uвых}$ частей. Выходная часть $V_{Uвых}$ представлена источником напряжения V_T и сопротивлением R_T согласно теореме Тевенина.

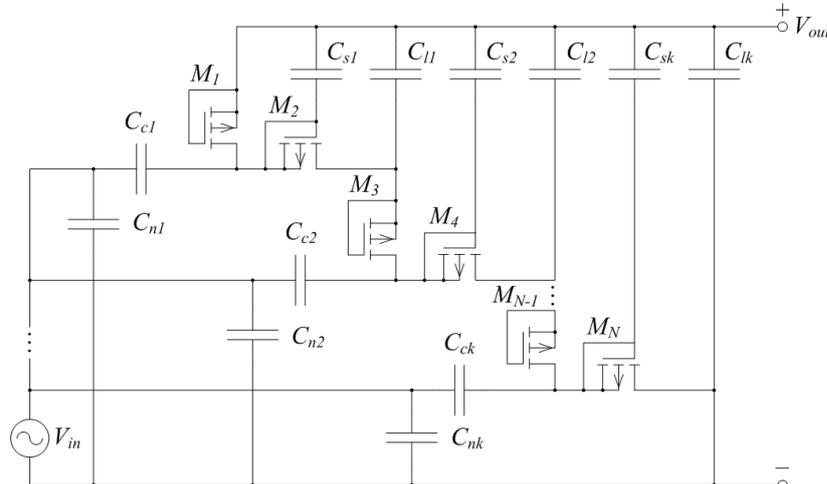


Рис. 2. Схема выпрямителя/умножителя: C_c – конденсаторы связи; C_l – нагрузочные конденсаторы; C_s , C_n – паразитные емкости

Мощность СВЧ сигнала в антенне P_a (см. рис. 1) определяется выражением [17]:

$$P_a = P_0 \cdot G(f) \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}, \quad (1)$$

где P_0 – плотность мощности у антенны, $G(f)$ – коэффициент усиления антенны на частоте f ; λ – длина волны.

Эффективность преобразования мощности СВЧ сигнала в мощность постоянного тока P_L (см. рис. 1) характеризуется коэффициентом эффективности по мощности [18]:

$$K_P = P_L/P_a. \quad (2)$$

Если получаемая мощность P_L превышает требуемую для питания микросистемы мощность P_d , то напряжение V_{out} на нагрузке в установившемся режиме существенно не изменяется и ректенна обеспечивает непрерывную работу микросистемы от собираемой энергии.

При низких уровнях мощности СВЧ сигнала $P_L < P_d$ применяется протокол работы с разделением фаз накопления собираемой энергии на накопительном конденсаторе C_L и расходования энергии за счет разряда накопительного конденсатора [15]. При сверхнизких уровнях плотности мощности длительность фазы накопления t_s может значительно превышать длительность фазы t_d расходования энергии. В течение достаточно длительного времени даже при небольшой мощности P_a накопительный конденсатор C_L может зарядиться собираемой энергией E_H до требуемой для работы микросистемы минимальной величины напряжения V_{out} , запасая энергию E_C .

$$E_C = C_L \cdot V_{out}^2/2 = K_P \cdot E_H = K_P \cdot \int_0^{t_s} P_a(t) dt. \quad (3)$$

Переключение ректенны из режима накопления в режим расходования энергии в схеме (см. рис. 1) может быть отражено изменением значения сопротивления R_L с R_L^s (накопление) на R_L^d (расходование), причем $R_L^s > R_L^d$.

Для ректенн, работающих при сверхнизких уровнях плотности мощности, определяющим параметром является не коэффициент эффективности по мощности K_p , а чувствительность [19–22]. Чувствительность определяется как минимальная мощность в антенне P_{amin} (обычно измеряется в дБм), при которой обеспечивается выполнение задачи, например, достигается требуемый уровень напряжения V_{out} [5].

Для согласования импедансов антенны и выпрямителя применяют различные схемы согласования [23], в которых могут использоваться пленочные спиральные индуктивности, МОП-конденсаторы или отрезки микрополосковых линий передачи [24]. В ректенне (см. рис. 1) схема согласования L-типа представлена эквивалентной индуктивностью L_m с сопротивлением потерь R_m и эквивалентной емкостью C_m .

Полное сопротивление цепи Z_m со входа схемы согласования (см. рис. 1) определяется выражением [24]:

$$Z_m = \frac{R_m + R_{in} - R_{in} \cdot C_k \cdot L_m \cdot \omega^2 + j\omega \cdot (L_m + R_m \cdot R_{in} \cdot C_k)}{1 + j\omega \cdot R_{in} \cdot C_k}, \quad (4)$$

где $\omega = 2\pi f$; $C_k = C_{in} + C_m$.

Из выражения (4) получим активную и реактивную части этого сопротивления:

$$Re(Z_m) = \frac{R_m + R_{in} + R_m \cdot R_{in}^2 \cdot C_k^2 \cdot \omega^2}{1 + R_{in}^2 \cdot C_k^2 \cdot \omega^2}, \quad (5)$$

$$Im(Z_m) = \frac{L_m \cdot (\omega + R_{in}^2 \cdot C_k^2 \cdot \omega^3) - R_{in}^2 \cdot C_k \cdot \omega}{1 + R_{in}^2 \cdot C_k^2 \cdot \omega^2}. \quad (6)$$

Для согласования импедансов с целью получения максимального K_p следует положить:

$$R_a + jX_a = Re(Z_m) + jIm(Z_m). \quad (7)$$

На резонансной частоте ω_0 справедливо:

$$X_a = Im(Z_m). \quad (8)$$

Из (6, 8) можно получить формулу для расчета значения индуктивности L_m :

$$L_m = \frac{R_{in}^2 \cdot C_k \cdot \omega_0 + X_a \cdot (1 + R_{in}^2 \cdot C_k^2 \cdot \omega_0^2)}{\omega_0 + R_{in}^2 \cdot C_k^2 \cdot \omega_0^3}. \quad (9)$$

В миниатюрных приборах с собиранием энергии из окружающей среды применяют укороченные антенны, для которых обычно можно пренебречь реактивной частью сопротивления jX_a или ее легко скомпенсировать реактивностью схемы согласования импедансов, а активная часть R_a практически равна сопротивлению излучения [17]. При $X_a = 0$ выражение (9) упрощается:

$$L_m = \frac{R_{in}^2 \cdot C_k}{1 + R_{in}^2 \cdot C_k^2 \cdot \omega_0^2}. \quad (10)$$

Напряжение в антенне V_a связано с мощностью гармонического сигнала P_a выражением [22]:

$$V_a = \sqrt{8 \cdot R_a \cdot P_a}. \quad (11)$$

Для ректенн, работающих при сверхнизких уровнях плотности мощности, чувствительность может быть повышена за счет резонансного усиления напряжения в схеме согласования импедансов [19–22]. Амплитуда напряжения V_{in} на входе ВУ, которая равна амплитуде напряжения на емкости контура C_{in} , будет превышать амплитуду напряжения V_a в Q раз (Q – добротность резонансного контура):

$$Q = \rho / (R_a + Re(Z_m)), \quad (12)$$

где $\rho = \sqrt{L_m / C_k}$.

Из (12) видно, что для увеличения добротности при сверхнизких уровнях мощности нужно уменьшать емкость C_k . При $C_m = 0$ получим $C_k = C_{in}$. Если $R_{in}^2 \cdot C_k^2 \cdot \omega_0^2 \gg 1$ и $R_{in} \gg R_m$, то из (5, 10, 12) можно получить:

$$L_m = 1/(C_{in} \cdot \omega_0^2), \quad (13)$$

$$Q = \frac{\sqrt{L_m/C_{in}}}{R_a + R_m + 1/(R_{in} \cdot C_{in}^2 \cdot \omega_0^2)}. \quad (14)$$

Для этого случая из (11, 14) получим:

$$V_{in} = V_a \cdot Q = \frac{\sqrt{8 \cdot R_a \cdot P_a \cdot L_m / C_{in}}}{R_a + R_m + 1/(R_{in} \cdot C_{in}^2 \cdot \omega_0^2)}. \quad (15)$$

Модель ректенны на основе МОП-транзисторов при сверхнизких уровнях мощности. Выражение (15) представляет собой модель антенны и схемы согласования импедансов. Для получения модели всей ректенны необходимо связать напряжения на входе V_{in} и выходе V_{out} выпрямителя/умножителя, т.е. включить модель ВУ (см. рис. 1).

В [25] рассмотрена модель выпрямителя на основе диодов Шоттки при достаточно высоких уровнях мощности в антенне. В отличие от этой статьи в данной работе многокаскадный выпрямитель/умножитель выполнен на p -канальных МОП-транзисторах (см. рис. 2), что обеспечивает при использовании типовых КМОП-технологий значительное снижение стоимости приборов. Кроме того, предлагаемая модель учитывает особенности работы МОП-транзисторов при сверхнизких уровнях мощности.

В режиме слабой инверсии выражение для выходного напряжения [16] с учетом снижения эффективности выпрямительных свойств диодов на основе МОП-транзисторов при сверхнизких напряжениях [15] можно записать в виде:

$$V_{out} = \left(\frac{C_c}{C_c + C_s} \cdot K_r \cdot V_{in} - V_D \right) \cdot N - \frac{N \cdot I_L}{2 \cdot (C_c + C_s) \cdot f}, \quad (16)$$

$$K_r = \left(1 - \frac{I^-}{I^+} \right) = \left(1 - \left(1 - \exp\left(\frac{-V_{in}}{\varphi_T}\right) \right) / \left(\exp\left(\frac{V_{in}}{\varphi_T}\right) - 1 \right) \right),$$

$$V_D = \frac{V_{th}}{n} + \varphi_T \cdot \ln \frac{I_L}{I_0},$$

$$I_0 = 2 \cdot \mu \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d} \cdot \frac{W}{L} \cdot n \cdot \varphi_T^2,$$

где K_r – эффективность выпрямления диода; I^+ , I^- – амплитуда тока диода при положительной и отрицательной амплитуде входного напряжения, соответственно [15]; V_D – напряжение смещения на МОП-транзисторе в диодном включении (при $V_D > 2 \cdot \varphi_T$); I_0 – характеристический ток транзистора; n – параметр наклона вольтамперной характеристики в подпороговой области; φ_T – тепловой потенциал; μ – подвижность носителей заряда в канале; ε – диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика; ε_0 – электрическая постоянная; d – толщина подзатворного диэлектрика; W – эффективная ширина канала; L – эффективная длина канала; V_{th} – пороговое напряжение; N – число транзисторов в ВУ.

Сопротивление переменному току транзистора в диодном включении при постоянном токе I_L получим из (16):

$$r_D = \frac{dV_D}{dI} = \frac{\varphi_T}{I_L}. \quad (17)$$

Ко входу ВУ (см. рис. 2) через емкости C_c параллельно подключены $N/2$ удвоителей напряжения, каждый из которых содержит по два диода на основе МОП-транзисторов. При $C_l \gg C_s$ можно считать, что эти диоды соединены параллельно по переменному току. Тогда из (17) с учетом коэффициента трансформации сопротивления диодов ко входу [24] $(1 + C_s/C_c)^2$ получим выражение для входного сопротивления ВУ:

$$R_{in} = \frac{\varphi_T}{N \cdot I_L} \cdot \left(\frac{C_c + C_s}{C_c} \right)^2. \quad (18)$$

Входную емкость BV с учетом того, что емкость каждого удвоителя напряжения равна емкости последовательно соединенных емкостей C_c и C_s , с учетом дополнительной паразитной емкости на входе каждого умножителя C_n (см. рис. 2) при $C_l \gg C_n$ можно оценить по формуле:

$$C_{in} = \frac{N}{2} \cdot \left(\frac{C_c \cdot C_s}{C_c + C_s} + C_n \right). \quad (19)$$

Из (16) можно также получить выражение для оценки выходного сопротивления BV по переменному току при токе в нагрузке I_L :

$$r_T = \left| \frac{dV_{out}}{dI} \right| = \left(\frac{1}{2 \cdot (C_c + C_s) \cdot f} + \frac{\varphi_T}{I_L} \right) \cdot N. \quad (20)$$

Из (15) можно получить выражение для оптимального значения сопротивления R_a , при котором достигается максимум V_{in} , т.е. обеспечивается максимальная чувствительность ректенны:

$$R_{aopt} = R_m + 1 / (R_{in} \cdot C_{in}^2 \cdot \omega_0^2). \quad (21)$$

Моделирование и анализ характеристик ректенны. Полученную аналитическую модель можно использовать для оценки характеристик ректенн при сверхнизких уровнях мощности и выработки рекомендаций по совершенствованию их конструкции с целью достижения заданных параметров.

Здесь следует отметить, что выражения (16-20) получены для идеализированной модели, не учитывающей ряд физических процессов в реальных нанометровых МОП-транзисторах.

При проектировании СБИС применяют современные САПР, включающие достаточно точные подсистемы моделирования. В настоящей работе в среде схемотехнического моделирования Tanner EDA (T-Spice) использовалась модель BSIM4v4.8.2 [26], учитывающая особенности конструкции и физических процессов в наноразмерных МОП-транзисторах. Параметры модели соответствуют МОП-транзисторам с низкими токами утечки, изготовленным по технологии КМОП 90 нм [27].

На рис. 3 в качестве примера использования разработанной модели представлены результаты расчетов по формулам (15-19) и моделирования в среде T-Spice.

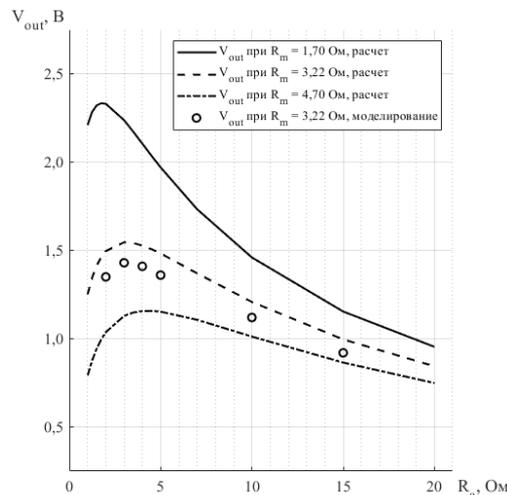


Рис. 3. Зависимости выходного напряжения ректенны V_{out} от сопротивления излучения R_a при мощности $P_a = -34$ дБм для различных значений сопротивления потерь R_m ; ключевые параметры: $V_{th} = -0.26$ В;

$$\mu = 0.027 \text{ м/В} \cdot \text{с}; d = 1.2 \text{ нм}; W/L = 43.5; n = 1.1; I_L = 10 \text{ нА}.$$

Отклонение результатов расчета по формулам от более точных результатов моделирования объясняется учетом в модели BSIM4v4.8.2 особенностей конструкции и физических процессов в наноразмерных МОП-транзисторах.

Анализ результатов расчетов и моделирования (см. рис. 3) и формул (4-21) показывает возможность оптимизации конструкции ректенн для обеспечения высокой чувствительности при сверхнизких уровнях мощности вплоть до -50 дБм. Выбирая электрофизические, структурные и топологические параметры в соответствии с выражениями (10-20), можно в определенных пределах управлять основными параметрами и характеристиками ректенны. Проведенный анализ показывает, что при использовании технологий КМОП уровня 14-32 мкм можно существенно повысить характеристики ректенн за счет снижения паразитных параметров. Применяемые в миниатюрных приборах укороченные антенны характеризуются малыми значениями сопротивления излучения [17], что при сверхнизких уровнях мощности способствует получению значительного резонансного усиления (см. рис. 3).

Заключение. В работе выполнен анализ особенностей построения и разработка модели ректенны на основе МОП-транзисторов для работы при сверхнизких уровнях мощности в составе автономных устройств с беспроводным питанием.

Получены выражения для оценки выходного напряжения ректенны с учетом основных параметров антенны, выпрямителя/умножителя напряжения и устройства согласования импедансов. Выполнены расчеты по полученным выражениям и моделирование с использованием модели BSIM4v4.8.2 для типовой КМОП-технологии 90 нм. Показана возможность построения ректенн на основе МОП-транзисторов при сверхнизких мощностях вплоть до -50 дБм. Даны рекомендации по выбору технологических и конструктивных параметров ректенн для собирания СВЧ энергии.

Результаты могут быть полезны для разработчиков беспроводных микроустройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shinohara N.* Wireless Power Transfer via Radiowaves. – London: ISTE Ltd., 2014. – 238 p.
2. *Tran L.-G., Cha H.-K., Park W.-T.* RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications // *Micro and Nano Systems Letters.* – 2017. – Vol. 5, No. 14. – P. 1-16.
3. *Luo Y., Pu L., Wang G., Zhao Y.* RF Energy Harvesting Wireless Communications: RF Environment, Device Hardware and Practical Issues // *Sensors.* – 2019. – Vol. 19. – Article 3010. – 28 p.
4. *Shinohara N.* History and Innovation of Wireless Power Transfer via Microwaves // *IEEE Journal on Microwaves.* – 2021. – Vol. 1, No. 1. – P. 218-228.
5. *Ibrahim H.H., Singh M.J., Al-Bawri S.S., Ibrahim S.K., Islam M.T., Alzamil A., Islam M.S.* Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications // *Sensors.* – 2022. Vol. 22, 4144. – 30 p.
6. *Binod Kumar Kanaujia, Neeta Singh, Sachin Kumar.* Rectenna: Wireless Energy Harvesting System. – Singapore: Springer, 2021. – 180 p.
7. *Gao S.-P., Ou J.-H., Zhang X., Guo Y.* Scavenging Microwave Wireless Power: A Unified Model, Rectenna Design Automation, and Cutting-Edge Techniques // *Engineering.* – 2023. – Vol. 30, No. 11. – P. 32-48.
8. *Rashid A.H., Ahmad B.H., Abd Aziz M.Z., Nornikman H.* Rectenna for Radio Frequency Energy Harvesting: A Review // *Elektrika.* – 2024. – Vol. 23, No. 1. – P. 12-17.
9. *Sadek D.H., Shawkey H.A., Zekry A.A.* Compact and High-Efficiency Rectenna for Wireless Power-Harvesting Applications // *Hindawi International Journal of Antennas and Propagation.* – 2021. – Vol. 21. – 1109850. – 8 p.
10. *Ali W., Subbyal H., Sun L., Shamoos S.* Wireless Energy Harvesting Using Rectenna Integrated with Voltage Multiplier Circuit at 2.4 GHz Operating Frequency // *Journal of Power and Energy Engineering.* – 2022. – No. 10. – P. 22-34.
11. *Pramono S., Shidiq D.D., Ibrahim M.H., Adriyanto F., Hikmaturokhman A.* RF energy harvesting using a compact rectenna with an antenna array at 2.45 GHz for IoT applications // *Journal of Electrical Engineering.* – 2021. – Vol. 72, No. 3. – P. 159-167.

12. *Pinuela M., Mitcheson P.D., Lucyszyn S.* Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2013. – Vol. 61, No. 7. – P. 2715-2726.
13. *Wagih M., Beeby S.* Thin Flexible RF Energy Harvesting Rectenna Surface with a Large Effective Aperture for Sub- $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ Powering of Wireless Sensor Nodes // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2022. – Vol. 70, No. 9. – P. 4328-4338.
14. *Chen Z., Song C., Zhang J., Zheng X., Volskiy V., Chu P., Vandenbosch G.A.* Wearable Rectenna with Integrated Miniaturized Feeding Slot and Rectifier Structure // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2023. – Vol. 71, No. 5. – P. 3868-3881.
15. *Конюлев Б.Г.* Анализ выпрямительных свойств нанометровых МОП-транзисторов в диодном включении при сверхнизких напряжениях // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 2 (238). – С. 175-183.
16. *Sinyukin A.S., Konoplev B.G.* Integrated CMOS Microwave Power Converter for Passive Wireless Devices // *Russian Microelectronics*. – 2021. – Vol. 50, No. 3. – P. 189-196.
17. *Johnson R.C.* Antenna Engineering Handbook. – New York: McGraw-Hill, 1993. – 988 p.
18. *Hameed Z., Moez K.* Design of impedance matching circuits for RF energy harvesting systems // *Microelectronics Journal*. – 2017. – Vol. 62. – P. 49-56.
19. *Shameli A., Safarian A., Rofougaran A., Rofougaran M., De Flaviis F.* Power Harvester Design for Passive UHF RFID Tag Using a Voltage Boosting Technique // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2007. – Vol. 55, No. 6. – P. 1089-1097.
20. *Le T., Mayaram K., Fiez T.* Efficient Far-Field Radio Frequency Energy Harvesting for Passively Powered Sensor Networks // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2008. – Vol. 43, No. 5. – P. 1287-1302.
21. *Oh S., Wentzloff D.D.* A -32dBm Sensitivity RF Power Harvester in 130nm CMOS // *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*. – June 2012, Canada, Montréal. – P. 483-486.
22. *Aksoyak I.K., Chletsou A., Papapolymerou J., Ulusoy A.C.* A High Sensitivity RF Energy Harvester for Diverse Environments // 2020 50th European Microwave Conference. – January 2021, Netherlands, Utrecht. – P. 444-447.
23. *Lee T. H.* The design of CMOS radio-frequency integrated circuits. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 797 p.
24. *Razavi B.* RF microelectronics. – New York: Prentice Hall, 2012. – 916 p.
25. *Barnett R.E., Liu J., Lazar S.* A RF to DC Voltage Conversion Model for Multi-Stage Rectifiers in UHF RFID Transponders // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2009. – Vol. 44, No. 2. – P. 354-370.
26. *Hu C., Niknejad A.M., Chauhan S.Y.* BSIM4v4.8.2 MOSFET Model – User’s Manual. – USA, CA, Berkeley: University of California, 2020. – 176 p.
27. *Sicard E., Bendhia S.D.* Basics of CMOS Cell Design. – New York: McGraw-Hill, 2007. – 429 p.

REFERENCES

1. *Shinohara N.* Wireless Power Transfer via Radiowaves. London: ISTE Ltd., 2014, 238 p.
2. *Tran L.-G., Cha H.-K., Park W.-T.* RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications, *Micro and Nano Systems Letters*, 2017, Vol. 5, No. 14, pp. 1-16.
3. *Luo Y., Pu L., Wang G., Zhao Y.* RF Energy Harvesting Wireless Communications: RF Environment, Device Hardware and Practical Issues, *Sensors*, 2019, Vol. 19, 3010, 28 p.
4. *Shinohara N.* History and Innovation of Wireless Power Transfer via Microwaves, *IEEE Journal on Microwaves*, 2021, Vol. 1, No. 1, pp. 218-228.
5. *Ibrahim H.H., Singh M.J., Al-Bawri S.S., Ibrahim S.K., Islam M.T., Alzamil A., Islam M.S.* Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications, *Sensors*, 2022, Vol. 22, 4144, 30 p.
6. *Binod Kumar Kanaujia, Neeta Singh, Sachin Kumar.* Rectenna: Wireless Energy Harvesting System. Singapore: Springer, 2021, 180 p.
7. *Gao S.-P., Ou J.-H., Zhang X., Guo Y.* Scavenging Microwave Wireless Power: A Unified Model, Rectenna Design Automation, and Cutting-Edge Techniques, *Engineering*, 2023, Vol. 30, No. 11, pp. 32-48.
8. *Rashid A.H., Ahmad B.H., Abd Aziz M.Z., Nornikman H.* Rectenna for Radio Frequency Energy Harvesting: A Review, *Elektrika*, 2024, Vol. 23, No. 1, pp. 12-17.
9. *Sadek D.H., Shawkey H.A., Zekry A.A.* Compact and High-Efficiency Rectenna for Wireless Power-Harvesting Applications, *Hindawi International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, Vol. 21, 1109850, 8 p.

10. Ali W., Subbyal H., Sun L., Shamoan S. Wireless Energy Harvesting Using Rectenna Integrated with Voltage Multiplier Circuit at 2.4 GHz Operating Frequency, *Journal of Power and Energy Engineering*, 2022, No. 10, pp. 22-34.
11. Pramono S., Shidiq D.D., Ibrahim M.H., Adriyanto F., Hikmaturokhman A. RF energy harvesting using a compact rectenna with an antenna array at 2.45 GHz for IoT applications, *Journal of Electrical Engineering*, 2021, Vol. 72, No. 3, pp. 159-167.
12. Pinuela M., Mitcheson P.D., Lucyszyn S. Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, Vol. 61, No. 7, pp. 2715-2726.
13. Wagih M., Beeby S. Thin Flexible RF Energy Harvesting Rectenna Surface with a Large Effective Aperture for Sub- $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ Powering of Wireless Sensor Nodes, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, Vol. 70, No. 9, pp. 4328-4338.
14. Chen Z., Song C., Zhang J., Zheng X., Volskiy V., Chu P., Vandenbosch G.A. Wearable Rectenna with Integrated Miniaturized Feeding Slot and Rectifier Structure // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, Vol. 71, No. 5. - pp. 3868-3881.
15. Konoplev B.G. Analiz vypryamitelnykh svoystv nanometrovykh MOP-tranzistorov v diodnom vklyuchenii pri sverkhnizkikh napryazheniyakh [Analysis of rectifier properties of nanometer MOSFETS in diode connection at ultra-low voltages], *Izvestiya YuFu. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 2 (238), pp. 175-183.
16. Sinyukin A.S., Konoplev B.G. Integrated CMOS Microwave Power Converter for Passive Wireless Devices, *Russian Microelectronics*, 2021, Vol. 50, No. 3, pp. 189-196.
17. Johnson R. C. *Antenna Engineering Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1993, 988 p.
18. Hameed Z., Moez K. Design of impedance matching circuits for RF energy harvesting systems, *Microelectronics Journal*, 2017, Vol. 62, pp. 49-56.
19. Shameli A., Safarian A., Rofougaran A., Rofougaran M., De Flaviis F. Power Harvester Design for Passive UHF RFID Tag Using a Voltage Boosting Technique, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, Vol. 55, No. 6, pp. 1089-1097.
20. Le T., Mayaram K., Fiez T. Efficient Far-Field Radio Frequency Energy Harvesting for Passively Powered Sensor Networks, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2008, Vol. 43, No. 5, pp. 1287-1302.
21. Oh S., Wentzloff D.D. A -32dBm Sensitivity RF Power Harvester in 130nm CMOS, *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, June 2012, Canada, Montréal, pp. 483-486.
22. Aksoyak I.K., Chletsou A., Papapolymerou J., Ulusoy A.C. A High Sensitivity RF Energy Harvester for Diverse Environments, *2020 50th European Microwave Conference*, January 2021, Netherlands, Utrecht, pp. 444-447.
23. Lee T.H. *The design of CMOS radio-frequency integrated circuits*. New York: Cambridge University Press, 2012, 797 p.
24. Razavi B. *RF microelectronics*. New York: Prentice Hall, 2012, 916 p.
25. Barnett R.E., Liu J., Lazar S. A RF to DC Voltage Conversion Model for Multi-Stage Rectifiers in UHF RFID Transponders, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, Vol. 44, No. 2, pp. 354-370.
26. Hu C., Niknejad A.M., Chauhan S.Y. BSIM4v4.8.2 MOSFET Model – User’s Manual. USA, CA, Berkeley: University of California, 2020, 176 p.
27. Sicard E., Bendhia S.D. *Basics of CMOS Cell Design*. New York: McGraw-Hill, 2007, 429 p.

Коноплев Борис Георгиевич – Южный федеральный университет; e-mail: kbg@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; д.т.н.; профессор; научный руководитель Института нанотехнологий, электроники и приборостроения.

Konoplev Boris Georgievich – Southern Federal University; e-mail: kbg@sfedu.ru; Taganrog, Russia; dr. of eng. sc., professor; scientific advisor, Institute of nanotechnologies, electronics, and equipment engineering.

М.М. Мигалин, В.А. Обуховец

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОЛЬГИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ПОМОЩЬЮ ПЕЧАТНЫХ СТРУКТУР

Рост требований пользователей к скорости обмена данными в телекоммуникационных системах привел к активному освоению мм-диапазона длин и интенсивному развитию широкополосных систем связи. Проектирование устройств СВЧ мм-диапазона волн с помощью САПР требует точного описания частотной зависимости диэлектрической проницаемости используемой подложки для сокращения времени разработки устройства. Целью данной статьи является определение относительной диэлектрической проницаемости фольгированного диэлектрика Rogers 3003G2 в мм-диапазоне длин волн. Для нахождения диэлектрической проницаемости был использован как нерезонансный, так и резонансный методы. Автоматизации процесса обработки данных измерений была достигнута с помощью разработанного скрипта в пакете MATLAB. Применяв метод разности фаз, заключающийся в применении двух микрополосковых линий разной длины, была определена относительная диэлектрическая проницаемость фольгированного диэлектрика в полосе 1–42 ГГц. Для отказа от использования зондовой станции с хрупкими зондами для измерений S-параметров в мм-диапазоне длин были разработаны SIW-резонаторы с волноводным возбуждением. Применяв три прототипа многомодовых SIW-резонаторов, была найдена относительная диэлектрическая проницаемость исследуемого диэлектрика в диапазоне 60–170 ГГц. Во избежание неоднозначности при определении номера продольной моды в SIW-резонаторах был разработан набор одномодовых SIW-резонаторов с различной величиной связи с возбуждающим волноводом. Варьируя длину возбуждающих щелей в SIW-резонаторах, были получены нагруженные резонансные частоты, по которым была определена ненагруженная резонансная частота, использованная для нахождения относительной диэлектрической проницаемости фольгированного диэлектрика. В заключении работы даны рекомендации по разработке SIW-резонаторов для определения свойств диэлектриков.

Относительная диэлектрическая проницаемость; SIW-резонаторы; ненагруженная резонансная частота.

M.M. Migalin, V.A. Obukhovets

PCB SUBSTRATES CHARACTERISATION USING PRINTED STRUCTURES

Growing user requirements for data exchange rates in telecommunication systems have resulted in the active adoption of mm-band wavelengths and the intensive development of broadband communication systems. Designing mm-wave microwave devices using CAD requires accurate frequency-dependent relative permittivity data for the used substrate to reduce the device design time. This paper focuses on determining the relative dielectric constant of the Rogers 3003G2 substrate in the mm-wavelength range. Both non-resonant and resonant methods were used to find the dielectric permittivity. The automation of the measurement data processing was achieved by using the developed script in MATLAB. The relative permittivity of the substrate in the band 1-42 GHz was determined by applying the phase difference method, using two microstrip lines of different lengths. SIW resonators with waveguide excitation were developed to avoid using a probe station with fragile probes for S-parameter measurements in the mm-length range. The relative permittivity of the studied substrate in the 60-170 GHz range was found using three prototype multi-mode SIW resonators. A set of single-mode SIW resonators with different waveguide excitation coupling was produced to avoid ambiguity in longitudinal mode number determination in multi-mode SIW resonators. Several loaded resonant frequencies were obtained by varying the length of SIW-resonators' excitation slots to calculate the unloaded resonant frequency used to find the relative dielectric permittivity of the substrate. Recommendations for developing SIW resonators for the determination of dielectric properties of the substrates are given in the conclusion section.

Relative dielectric permittivity; SIW – resonators; unloaded resonant frequency.

Введение. Определение диэлектрических свойств материалов играет важную роль в промышленности и в сельском хозяйстве. По данным о комплексной диэлектрической проницаемости возможно определение объемных долей жидкостей и твердых частиц [1, 2], выявление загрязняющих веществ в почве [3], разработка устройств накопления энергии [4]. Точные значения диэлектрической проницаемости на разных частотах игра-

ют особую роль при проектировании техники СВЧ. При известных параметрах диэлектрика возможно моделирование СВЧ – устройств в САПР, что существенно сокращает их время разработки. Развитие систем связи 5G и 6G повысило требования к фольгированным диэлектрикам, что привело к появлению как новых материалов [5], так и новых подходов к измерению диэлектрической проницаемости СВЧ – материалов [6–7].

Обзор методов измерения диэлектрической проницаемости. Все методы определения диэлектрической проницаемости в частотной области можно разделить на две группы: резонансные и нерезонансные [8]. Резонансные методы обладают высокой точностью, зачастую применяются для работы с диэлектриками, обладающими низкими потерями, но позволяют определять свойства диэлектрика в узкой полосе частот, в то время как нерезонансные методы позволяют измерить диэлектрическую проницаемость в широком частотном диапазоне, но их точность ниже.

Резонансные методы. Данная группа методов основана либо на измерении резонансной частоты резонатора при наличии и отсутствии измеряемого материала, либо на определении собственной частоты резонатора, заполненного исследуемым материалом. В качестве объемных резонаторов могут выступать различные конфигурации цилиндрических резонаторов [9–11], верхняя рабочая частота которых ограничена размерами фидерных систем. К этой группе относятся и открытые резонаторы Фабри – Перо [12], диэлектрические резонаторы [13], коаксиальные резонаторы [14] и класс печатных резонаторов [15], в котором можно выделить одномодовые и многомодовые SIW – резонаторы [16] и кольцевые резонаторы [17], применяемые в мм-диапазоне длин волн.

Нерезонансные методы. Методы этой группы используют изменение фазовой скорости в линии передачи, заполненной полностью или частично исследуемым диэлектриком. Выделяют отражательные методы и методы, основанные на прохождении электромагнитного поля (ЭМП) через исследуемый образец. Для применения одного из методов прохождения, необходимо разместить анализируемый материал между двумя источниками ЭМП. Диэлектрик может быть расположен между антеннами [18], внутри волновода [19] или выступать в качестве подложки для микрополосковой линии (МПЛ) [20]. Отражательные методы используют отрезки линии передач, нагруженные на исследуемый материал. Распространение получили коаксиальные и волноводные линии передач для оценки свойств диэлектрика [21]. В качестве альтернативы закрытым направляющим системам выступают моностатический и бистатический методы в открытом пространстве [8].

В настоящее время печатные резонаторы получили широкое распространение из-за возможности определения эффективной относительной диэлектрической проницаемости («effective dielectric constant»), которая учитывает топологию печатной платы и шероховатость меди [22]. Многомодовые SIW – резонаторы позволяют определить относительную диэлектрическую проницаемость в широкой полосе частот с высокой точностью, но для их применения требуется начальное приближение для величины относительной диэлектрической проницаемости [23], что ограничивает применимость этого метода. В работе [23] также не описано влияния возбуждающей щели, выступающей в роли нагрузки, на смещение резонансных частот. Кольцевые резонаторы тоже позволяют определить параметры диэлектрика в широкой полосе частот, но в мм-диапазоне такие измерения требуют применения зондовых установок, а без учета излучения возбуждающих щелей снижается точность определения тангенса диэлектрических потерь [17].

2. Сравнительный анализ методов определения относительной диэлектрической проницаемости. В настоящей статье рассматривается применение набора печатных структур, для определения относительной диэлектрической проницаемости фольгированного диэлектрика RO3003G2 в диапазоне 1–170 ГГц.

2.1. Метод разности фаз. Данный метод заключается в определении эффективной диэлектрической проницаемости по результатам измерений фазового набега в двух МПЛ разной длины, расположенных на одинаковой подложке. Этот метод был рассмотрен в [21] для определения относительной диэлектрической проницаемости фольгированного диэлектрика в диапазоне 1–4 ГГц с точностью 0,5–1%. Авторы работы показали, что точность метода возрастает с увеличением разницы физических длин МПЛ. В настоящей работе данный метод будет использован для получения начального приближения ϵ .

Пусть на диэлектрической подложке толщиной h , расположены две МПЛ шириной w с длинами l_1 и l_2 , согласованные с возбуждающим СВЧ – соединителем. Фазовый набег для каждой МПЛ может быть определен как:

$$\Phi_1 = \frac{2\pi}{c} fl_1 \sqrt{\varepsilon_{эфф}}, \quad \Phi_2 = \frac{2\pi}{c} fl_2 \sqrt{\varepsilon_{эфф}}, \quad (1)$$

где f – частота, $\varepsilon_{эфф}$ – относительная эффективная диэлектрическая проницаемость, c – скорость света в вакууме. Зная длины МПЛ, можно определить относительную эффективную диэлектрическую проницаемость:

$$\varepsilon_{эфф}(f) = \left(\frac{c(\Phi_1 - \Phi_2)}{2\pi f(l_1 - l_2)} \right)^2. \quad (2)$$

Для определения характеристик фольгированного диэлектрика Rogers 3003G2 были изготовлены две МПЛ с разницей длин 29 мм. Коэффициент передачи S_{21} был определен с помощью откалиброванного векторного анализатора цепей (ВАЦ). Применяя выражения для вычисления относительной диэлектрической проницаемости по известной эффективной относительной диэлектрической проницаемости [24], представим значения ε в диапазоне 1–45 ГГц на рис. 1:

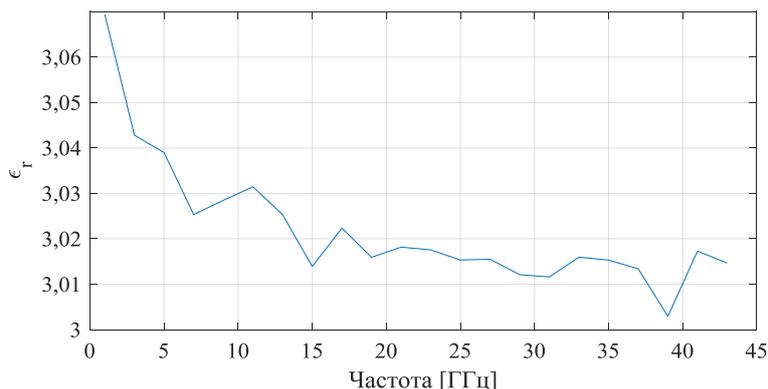


Рис. 1. Относительная диэлектрическая проницаемость Rogers 3003G2 в диапазоне 1–45 ГГц

Согласно технической документации Rogers [25], относительная диэлектрическая проницаемость ε на частоте 10 ГГц составляет $3 \pm 0,04$ что согласуется с результатом на рис. 1.

2.2. Многомодовые SIW-резонаторы. SIW-резонатор представляет собой неизлучающую СВЧ-структуру, которую можно возбуждать как щелью, так и с помощью МПЛ, как показано на рис. 2. Резонансная частота SIW-резонатора может быть определена как [23]:

$$f_U = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{w_{эфф}}\right)^2 + \left(\frac{n}{h_{эфф}}\right)^2 + \left(\frac{k}{l_{эфф}}\right)^2}, \quad (3)$$

где m, n, k – число вариаций поля по осям x, y и z , $w_{эфф}, h_{эфф}, l_{эфф}$ – эффективные значения ширины, высоты и длины эквивалентного прямоугольного волновода.

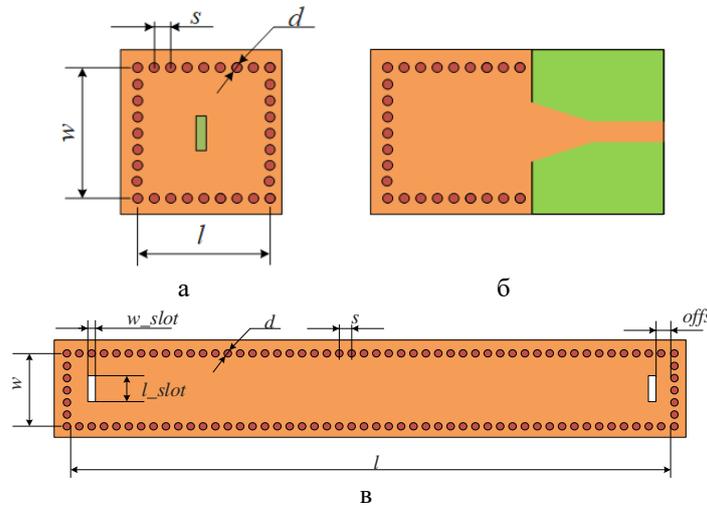


Рис. 2. SIW-резонаторы: а – волноводное возбуждение одномодового резонатора; б – микрополосковое возбуждение одномодового резонатора; в – волноводное возбуждение многомодового резонатора.

Согласно [26], размеры эквивалентного прямоугольного волновода могут быть определены как:

$$w_{eff} = w \cdot \left(\xi_1 + \frac{\xi_2}{\frac{s}{d} + \frac{\xi_1 + \xi_2 - \xi_3}{\xi_3 - \xi_1}} \right), \quad (4)$$

$$\xi_1 = 1,0198 + \frac{0,3465}{\frac{w}{s} - 1,0684}, \xi_2 = -0,1183 - \frac{1,2729}{\frac{w}{s} - 1,2010}, \xi_3 = 1,0082 - \frac{0,9163}{\frac{w}{s} + 0,2152},$$

где d – диаметр металлизированного межслойного отверстия, s – расстояние между центрами близлежащих проходных отверстий, w, l, h – ширина, длина и высота SIW – резонатора.

С использованием значений \mathcal{E} , полученных методом разности фаз, были разработаны и изготовлены три многомодовых SIW-резонатора, резонансные частоты которых находятся в диапазоне 65–170 ГГц. В соответствии с технологическими возможностями производства и условием минимизации потерь на излучение через межслойные отверстия, расстояние между металлизированными переходными отверстиями s было принято равным 250 мкм, диаметр переходных отверстий $d = 150$ мкм, высота резонаторов $h = 0,127$ мм. Размеры и положение возбуждающих щелей были выбраны таким образом, чтобы минимизировать их влияние на резонансные пики. Макрофотография возбуждающей щели резонатора 75–110 ГГц приведена на рис. 3, а на рис. 4 представлено сравнение коэффициентов передачи, полученных в ходе моделирования в САПР CST Studio и в ходе измерений.

Был разработан скрипт в среде MATLAB, который автоматически определяет резонансные частоты, а по ним вычисляет значения \mathcal{E} . Агрегированные результаты работы скрипта для трех резонаторов представлены на рис. 5. Снижение величины \mathcal{E} в диапазоне 85–110 ГГц, а затем её рост в диапазоне 110–170 ГГц может быть объяснен как отклонением геометрических размеров произведенных резонаторов от требуемых, так и неверным определением номера продольной моды k .

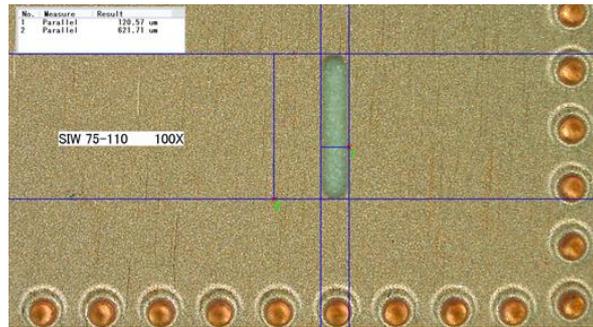


Рис. 3. Макрофотография возбуждающей щели SIW-резонатора диапазона 75–110 ГГц

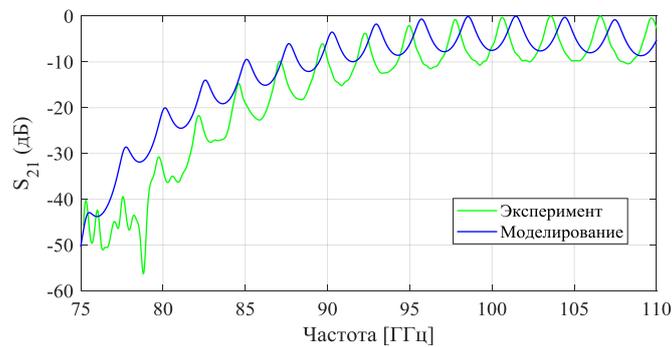


Рис. 4. Сравнение расчетного коэффициента передачи и экспериментально определенного для SIW-резонатора в полосе 75–110 ГГц

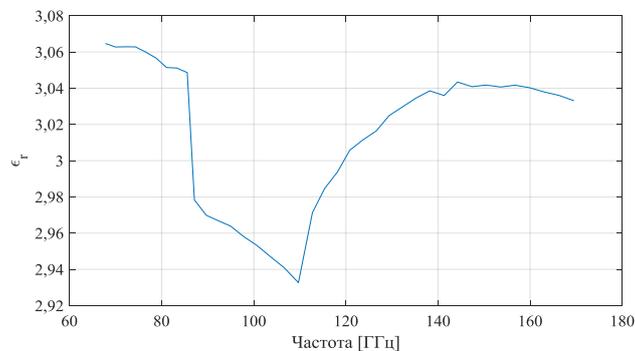


Рис. 5. Экспериментально определенное значение относительной диэлектрической проницаемости с помощью трех многомодовых SIW-резонаторов

2.3. Одномодовые SIW-резонаторы. Использование одномодовых резонаторов исключает неоднозначность при определении номера моды, требуемой для определения ϵ с помощью резонаторов, рассмотренных выше. При варьировании размеров возбуждающих щелей было замечено, что из-за связи между фидерной линией и резонатором резонансные частоты смещаются. Как показано в работе [27], связь между нагруженной f_L и ненагруженной f_U резонансными частотами может быть записана как:

$$f_L = f_U \cdot \left(1 + \frac{A}{Q_e^a}\right), \quad (5)$$

где Q_e – внешняя добротность, a и A – произвольные коэффициенты.

Необходимо решить систему из трех и более уравнений (3) для определения собственной резонансной частоты, так как внешняя добротность Q_e может быть определена исходя из диаметра резонансной окружности на диаграмме Вольперта-Смита по методике, описанной в [28]. Для получения набора нагруженных частот было предложено варьировать ширину возбуждающей щели, что приводит к изменению коэффициента связи с фидерной линией, а, следовательно, и к изменению резонансной частоты.

В качестве примера рассмотрим резонатор на подложке толщиной $h = 0,127$ мм, выполненной из материала RO3003G2 с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$. Пусть шаг межслойных металлизированных отверстий $s = 0,25$ мм, их диаметр $d = 0,15$ мм, а ширина резонатора $w = 4,2$ мм и длина $l = 4,3$ мм. Согласно результатам моделирования данного резонатора в САПР CST Studio методом собственных мод, резонансная частота такой структуры составит 29,56 ГГц. Результаты параметризации ширины возбуждающей щели представлены на рис. 6. Чем больше апертура возбуждающей щели, тем больше влияние питающего волновода на резонансные свойства SIW и тем ниже нагруженная резонансная частота.

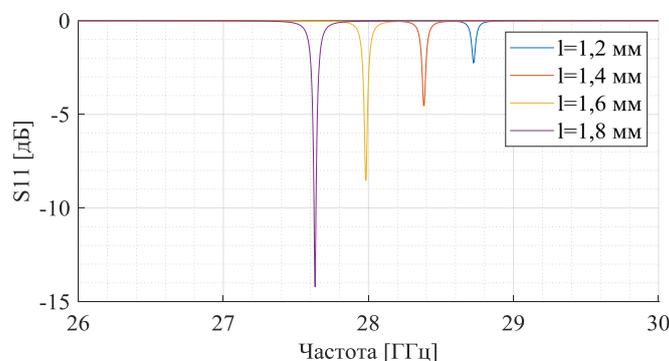


Рис. 6. Влияние ширины возбуждающей щели на коэффициент отражения S_{11}

Используя резонансные частоты, определим ненагруженную резонансную частоту применив выражение (5) и приведем рассчитанные значения на рис. 7.

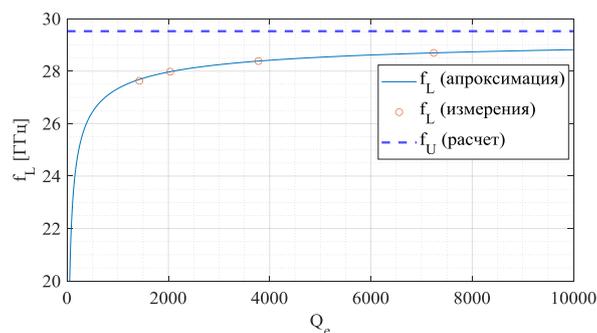


Рис. 7. Зависимость резонансной частоты от внешней добротности, $f_U = 29,52$ ГГц

Для определения относительной диэлектрической проницаемости были разработаны и изготовлены 36 пар резонаторов, покрывающие 12 частот с тремя разными по длине возбуждающими щелями. Изготовленные резонаторы изображены на рис. 8, а измерительная установка на рис. 9.

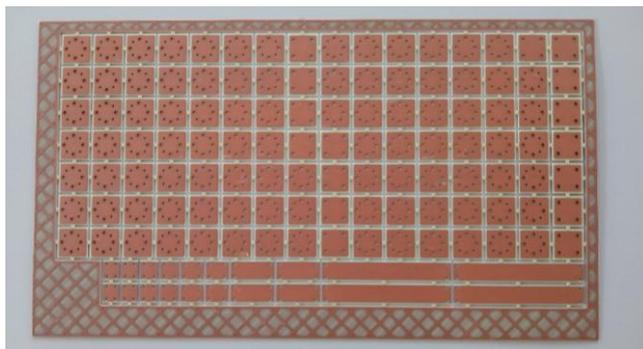


Рис. 8. Изготовленные SIW-резонаторы

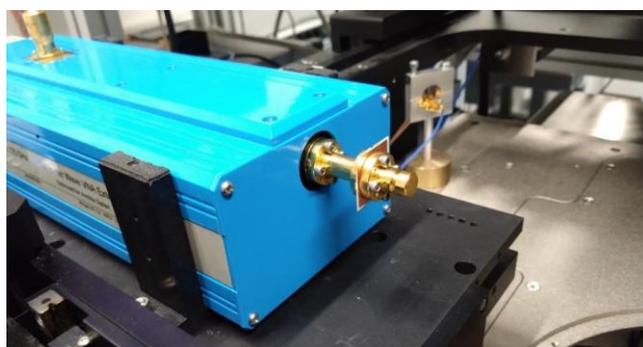


Рис. 9. Измерительный стенд: ВАЦ с частотным расширителем для измерения S_{11} одномодовых резонаторов

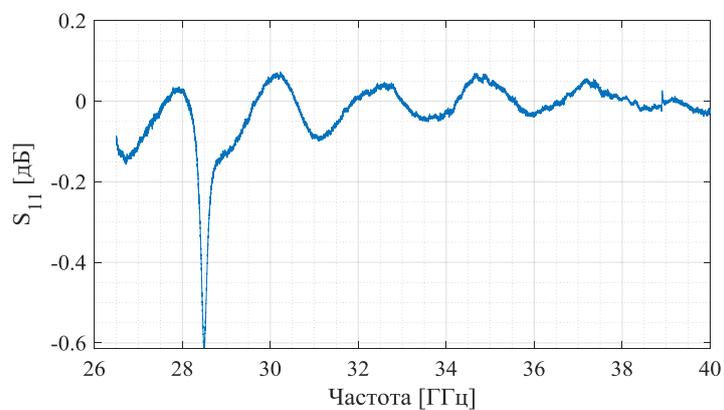


Рис. 10. Коэффициент отражения от входа резонатора с $f_L = 28,2$ ГГц

Из-за малой связи ВАЦ с резонаторами (рис. 10), методика, описанная в [28], применима только для отдельных прототипов, приведенных в таблице.

По полученным частотам f_U были определены значения относительной диэлектрической проницаемости, которые согласуются с результатами, полученными с помощью многомодовых резонаторов.

f_{eigen} (ГГц)	l_{slot} (мм)	Образец – 1		Образец – 2		f_U (ГГц)
		f_L (ГГц)	Q_e	f_L (ГГц)	Q_e	
129,55	0,3	130,92	2662	130,72	2980	133,32
	0,4	129,99	1063	129,33	1132	
	0,5	128,39	354	127,21	412,9	
	0,6	125,81	161,5	125,08	169	
140,407	0,3	140,89	6300	142,15	1940	140,899
	0,4	140,34	857,1	139,46	995	
	0,5	137,28	305,2	138,04	344,7	
149,96	0,3	150,46	1988	150,59	1616	152,556
	0,4	148,58	516	148,49	547	
	0,5	147	255	146,22	280	

Заключение. В работе было проведено исследование различных методов определения частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости подложки Rogers 3003G2. Неоднозначность номера продольной моды при определении относительной диэлектрической проницаемости была преодолена применением одномодовых SIW-резонаторов и расчетом начального значения диэлектрической проницаемости, полученного с помощью метода разности фаз. Преимущество данного подхода состоит в отсутствии необходимости использовать зондовую станцию для определения S-параметров резонаторов. Использование набора резонаторов с различной шириной возбуждающей щели позволяет определить ненагруженную резонансную частоту, с помощью которой возможно определение относительной диэлектрической проницаемости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang C., Liu X., Huang Z., Yu S., et al. A Sensor for Characterisation of Liquid Materials with High Permittivity and High Dielectric Loss // *Sensors*. – 2022. – 22, 1764. – DOI: 10.3390/s22051764.
2. Shiheng H., Huang J. A Novel Substrate Integrated Waveguide Shorted Coaxial Resonator for Characterizing Complex Permittivity of Liquids and Solid Content of Water-based Ferrofluid // *IEEE Sensors Journal*. – 1 July, 2024. – Vol. 24, No. 13. – P. 20549-20558. – DOI: 10.1109/JSEN.2024.3399323.
3. Vergnano A., Godio A., Raffa CM., et al. Open-Ended Coaxial Probe Measurements of Complex Dielectric Permittivity in Diesel-Contaminated Soil during Bioremediation // *Sensors*. – 2020. – 20 (22):6677. – DOI: 10.3390/s20226677.
4. Zha J.W., et al. Polymer-based dielectrics with high permittivity for electric energy storage: A review // *Nano Energy*. – 2021. – 89. – 106438.
5. Takenori K., et al. Material design and high frequency characterization of novel ultra-low loss dielectric material for 5G and 6G applications // 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC). – IEEE, 2021. – P. 538-543.
6. Krupka J., Pacewicz A., Kopyt P., Salski P. Measurements of the complex permittivity of low loss ferrites at millimeter wave frequencies // *Materials Research Bulletin*. – 2024. – Vol. 179. – P. 112994. – DOI: 10.1016/j.materresbull.2024.112994.
7. Mosavirik T., Hashemi M., Soleimani M., et al. Accuracy-Improved and Low-Cost Material Characterization Using Power Measurement and Artificial Neural Network // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – Vol. 70. – P. 1-9, 202. – DOI: 10.1109/TIM.2021.3126011.
8. Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K. Microwave electronics. Measurements and materials characterization. – John Wiley & Sons, 2004. – 552 p.
9. Белов Ю.Г., Кузнецова А.А., Нефедьев И.А. Цилиндрический резонатор для измерения параметров диэлектрических пластин // Информационные системы и технологии - 2019: Сб. материалов XXV Международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 199-204.
10. Krupka J. Measurements of the Complex Permittivity of Low Loss Polymers at Frequency Range From 5 GHz to 50 GHz // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2016. – Vol. 26, No. 6. – P. 464-466.
11. Marqués-Villarroya D., et al. Enhanced Full-Wave Circuit Analysis for Modeling of a Split Cylinder Resonator // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2017. – Vol. 65, No. 4. – P. 1191-1202.

12. *Possenti L., et al.* Improved Fabry-Pérot electromagnetic material characterization: Application and results // *Radio Science*. – Nov. 2020. – Vol. 55, No. 11. – P. 1-15. – DOI 10.1029/2020RS007164.
13. *Naoki H., et al.* Measurement technique for interface and surface conductivities at millimeter-wave frequencies using dielectric rod resonator excited by nonradiative dielectric waveguide // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2022. – 70.5. – P. 2750-2761.
14. *Walia G., Laforge P. D., Azam S., Paranthaman R.* Dielectric Characterization Using Reflected Group Delay of a Partially Filled Coaxial Resonator // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – P. 123581-123594. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3453658.
15. *Alahnomi R.A., Zakaria, Z., Yussof Z.M., et al.* Review of Recent Microwave Planar Resonator-Based Sensors: Techniques of Complex Permittivity Extraction, Applications, Open Challenges and Future Research Directions // *Sensors*. – 2021. – 21, 2267. – DOI: 10.3390/s21072267.
16. *Khair N.S., Yusof N.A.T., Wahab Y.A., et al.* Substrate-integrated waveguide (SIW) microwave sensor theory and model in characterising dielectric material: A review // *Sensors International*. – 2023. – Vol. 4. – P. 100244. – DOI: 10.1016/j.sintl.2023.100244.
17. *Nahid A.A., et al.* Characterization of alumina ribbon ceramic substrates for 5G and mm-wave applications // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. – 2022. – 12.9. – P. 1432-1445.
18. *Liu X., Gan L., Yang B.* Millimeter-wave free-space dielectric characterization // *Measurement*. – 2021. – Vol. 179. – P. 109472. – DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109472.
19. *Kok Yeow Y., Goudos Sotirios K.* Materials characterization using microwave waveguide system // *Microwave systems and applications*. – 2017. – P. 341-358.
20. *Das N.K., Voda S.M., Pozar D.M.* Two Methods for the Measurement of Substrate Dielectric Constant // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – July 1987. – Vol. 35, No. 7. – P. 636-642.
21. *Гусев Ю.А.* Основы диэлектрической спектроскопии: учеб. пособие. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2008. – 112 с.
22. *Dmitriev-Zdorov V., Simonovich B., Kochikov I.* A causal conductor roughness model and its effect on transmission line characteristics // *Proc. DesignCon*. – 2018. – P. 1-31.
23. *Wang H. B., Cheng Y. J.* Broadband Printed-Circuit-Board Characterization Using Multimode Substrate-Integrated-Waveguide Resonator // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – June 2017. – Vol. 65, No. 6. – P. 2145-2152.
24. *Garg R., Bahl I., Bozzi M.* Microstrip lines and slotlines. – Norwood: Artech house, 2013. – 560 p.
25. RO3003G2 Laminates. RO3003G2 Laminates Data Sheet. – URL: <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003g2-laminates> (дата обращения: 30.09.2024).
26. *Yan L., Hong W., Hua G., et al.* Simulation and experiment on SIW slot array antennas // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – Sept. 2004. – Vol. 14, No. 9. – P. 446-448. – DOI: 10.1109/LMWC.2004.832081.
27. *Canós, A.J., Catalá-Civera, J.M., Penaranda-Foix F.L., Reyes-Davo E.* A novel technique for deembedding the unloaded resonance frequency from measurements of microwave cavities // *IEEE transactions on microwave theory and techniques*. – 2006. – 54 (8). – P. 3407-3416.
28. *Kajfez D.* Q Factor Measurements Using MATLAB. – Norwood: Artech house, 2011. – 189 p.

REFERENCES

1. *Wang C., Liu X., Huang Z., Yu S., et al.* A Sensor for Characterisation of Liquid Materials with High Permittivity and High Dielectric Loss, *Sensors*, 2022, 22, 1764. DOI: 10.3390/s22051764.
2. *Shiheng H., Huang J.* A Novel Substrate Integrated Waveguide Shorted Coaxial Resonator for Characterizing Complex Permittivity of Liquids and Solid Content of Water-based Ferrofluid, *IEEE Sensors Journal*, 1 July, 2024, Vol. 24, No. 13, pp. 20549-20558. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3399323.
3. *Vergnano A., Godio A., Raffa CM., et al.* Open-Ended Coaxial Probe Measurements of Complex Dielectric Permittivity in Diesel-Contaminated Soil during Bioremediation, *Sensors*, 2020, 20 (22):6677. DOI: 10.3390/s20226677.
4. *Zha J.W., et al.* Polymer-based dielectrics with high permittivity for electric energy storage: A review, *Nano Energy*, 2021, 89, 106438.
5. *Takenori K., et al.* Material design and high frequency characterization of novel ultra-low loss dielectric material for 5G and 6G applications, *2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. IEEE, 2021, pp. 538-543.
6. *Krupka J., Pacewicz A., Kopyt P., Salski P.* Measurements of the complex permittivity of low loss ferrites at millimeter wave frequencies, *Materials Research Bulletin*, 2024, Vol. 179, pp. 112994. DOI: 10.1016/j.materresbull.2024.112994.
7. *Mosavirik T., Hashemi M., Soleimani M., et al.* Accuracy-Improved and Low-Cost Material Characterization Using Power Measurement and Artificial Neural Network, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 70, pp. 1-9, 202. DOI: 10.1109/TIM.2021.3126011.

8. *Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K.* Microwave electronics. Measurements and materials characterization. John Wiley & Sons, 2004, 552 p.
9. *Belov Yu.G., Kuzheleva A.A., Nefed'ev I.A.* Tsilindricheskii rezonator dlya izmereniya parametrov dielektricheskikh plastin [Cylindric resonator for dielectric slabs characterisation], Informacionnye sistemy i tehnologii [Information systems and technologies], Sbornik materialov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Proceedings of the XXV international conference], 2019, pp. 199-204.
10. *Krupka J.* Measurements of the Complex Permittivity of Low Loss Polymers at Frequency Range From 5 GHz to 50 GHz, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, Vol. 26, No. 6, pp. 464-466.
11. *Marqués-Villarroya D., et al.* Enhanced Full-Wave Circuit Analysis for Modeling of a Split Cylinder Resonator, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, Vol. 65, No. 4, pp. 1191-1202.
12. *Possenti L. et al.* Improved Fabry-Pérot electromagnetic material characterization: Application and results, *Radio Science*, Nov. 2020, Vol. 55, No. 11, pp. 1-15. DOI 10.1029/2020RS007164.
13. *Naoki H., et al.* Measurement technique for interface and surface conductivities at millimeter-wave frequencies using dielectric rod resonator excited by nonradiative dielectric waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70.5, pp. 2750-2761.
14. *Walia G., Laforge P. D., Azam S., Paranthaman R.* Dielectric Characterization Using Reflected Group Delay of a Partially Filled Coaxial Resonator, *IEEE Access*, 2024, Vol. 12, pp. 123581-123594. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3453658.
15. *Alahmomi R.A., Zakaria, Z., Yusof Z.M., et al.* Review of Recent Microwave Planar Resonator-Based Sensors: Techniques of Complex Permittivity Extraction, Applications, Open Challenges and Future Research Directions, *Sensors*, 2021, 21, 2267. DOI: 10.3390/s21072267.
16. *Khair N.S., Yusof N.A.T., Wahab Y.A., et al.* Substrate-integrated waveguide (SIW) microwave sensor theory and model in characterising dielectric material: A review, *Sensors International*, 2023, Vol. 4, pp. 100244. DOI: 10.1016/j.sintl.2023.100244.
17. *Nahid A.A., et al.* Characterization of alumina ribbon ceramic substrates for 5G and mm-wave applications, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2022, 12.9, pp. 1432-1445.
18. *Liu X., Gan L., Yang B.* Millimeter-wave free-space dielectric characterization, *Measurement*, 2021, Vol. 179, pp. 109472. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109472.
19. *Kok Yeow Y., Goudos Sotirios K.* Materials characterization using microwave waveguide system, *Microwave systems and applications*, 2017, pp. 341-358.
20. *Das N.K., Voda S.M., Pozar D.M.* Two Methods for the Measurement of Substrate Dielectric Constant, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, July 1987, Vol. 35, No. 7, pp. 636-642.
21. *Gusev Yu. A.* Osnovy dielektricheskoy spektroskopii: ucheb. posobie [Foundations of dielectric spectroscopy: textbook]. Kazan': Kazan. gos. un-t, 2008, 112 p.
22. *Dmitriev-Zdorov V., Simonovich B., Kochikov I.* A causal conductor roughness model and its effect on transmission line characteristics, *Proc. DesignCon.*, 2018, pp. 1-31.
23. *Wang H. B., Cheng Y. J.* Broadband Printed-Circuit-Board Characterization Using Multimode Substrate-Integrated-Waveguide Resonator, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, June 2017, Vol. 65, No. 6, pp. 2145-2152.
24. *Garg R., Bahl I., Bozzi M.* Microstrip lines and slotlines. Norwood: Artech house, 2013, 560 p.
25. RO3003G2 Laminates. RO3003G2 Laminates Data Sheet. Available at: <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003g2-laminates> (accessed 30 September 2024).
26. *Yan L., Hong W., Hua G., et al.* Simulation and experiment on SIW slot array antennas, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Sept. 2004, Vol. 14, No. 9, pp. 446-448. DOI: 10.1109/LMWC.2004.832081.
27. *Canós, A.J., Catalá-Civera, J.M., Penaranda-Foix F.L., Reyes-Davo E.* A novel technique for deembedding the unloaded resonance frequency from measurements of microwave cavities, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2006, 54 (8), pp. 3407-3416.
28. *Kajfez D.* Q Factor Measurements Using MATLAB. Norwood: Artech house, 2011, 189 p.

Мигалин Михаил Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: migalin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

Обуховец Виктор Александрович – e-mail: vaobuhovec@sfedu.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; д.т.н.; профессор.

Migalin Mikhail Mikhaylovich – Southern Federal University; e-mail: migalin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371733; the Department of Antennas and Radio Transmitters; postgraduate.

Obukhovets Viktor Alexandrovich – e-mail: vaobuhovec@sfedu.ru; the Department of Antennas and Radio Transmitters; professor; dr. of eng. sc.; professor.

В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, А.Ю. Головин, Д.С. Мироненко

**СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ БАТАРЕИ БПЛА С ФУНКЦИЯМИ
БАЛАНСИРОВКИ НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ**

Рассмотрен вопрос создания системы беспроводной зарядки бортовой батареи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с учетом необходимости балансировки напряжений ее элементов. При проектировании системы на основании краткого обзора принципов реализации беспроводной передачи энергии за основу взят принцип использования магнитно-связанных контуров как наиболее подходящий по своим технико-экономическим свойствам. Целью работы является разработка схемного решения системы беспроводной зарядки батареи БПЛА с возможностью балансировки напряжений как при зарядке, так и во время работы на нагрузку. Применение такой системы позволит повысить безопасность эксплуатации батареи и продлить срок ее службы за счет выравнивания степени износа (старения) элементов. В результате исследования разработана схема и изготовлен экспериментальный образец указанной системы беспроводной зарядки. При синтезе схемы ставилась задача минимизации количества компонентов в силовых цепях с целью уменьшения массы системы и ее стоимости. Максимальная мощность экспериментальной системы беспроводной зарядки превышает 100 Вт (25 В 4 А) и для примененной бортовой аккумуляторной батареи емкостью 1500 мА·ч является несколько избыточной. Принудительного охлаждения приемной части не требуется. Масса приемной части, устанавливаемой на беспилотный летательный аппарат, составляет 79 г (40 г – приемная катушка и 39 г – блок электроники) и имеет резервы для уменьшения за счет снижения сечения проводников приемной катушки, применения в блоке электроники текстолита с меньшей толщиной, уплотнения монтажа и применения двустороннего расположения компонентов. Проведены лабораторные испытания, подтвердившие работоспособность предложенных технических решений, выполнена оценка эффективности балансировки при зарядке. Для оценки эффективности системы балансировки в ходе экспериментов осуществлен расчет выходного сопротивления приемника ($\partial U/\partial I$) относительно одного из элементов бортовой аккумуляторной батареи при изменении напряжения на нем. Результат составил 1,9 Ом при токе заряда 0,8 А (батарея 6S 1500 мА·ч).

Беспроводная зарядка; воздушный трансформатор; балансировка батареи; синхронный выпрямитель; резонансный трансформатор.

V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, A.Y. Golovin, D.S. Mironenko

**WIRELESS UAV CHARGING SYSTEM WITH BATTERY BALANCING
FUNCTIONALITY**

The issue of creating a wireless charging system for an on-board battery of an unmanned aerial vehicle (UAV) is considered, taking into account the need to balance the voltages of its elements. When designing the system, based on a brief overview of the principles of wireless energy transmission, the principle of using magnetically coupled circuits is taken as the most suitable in terms of its technical and economic properties. The aim of the work is to develop a circuit solution for a UAV's wireless battery charging system with the ability to balance voltages both during charging and during load operation. The use of such a system will improve the safety of battery operation and extend its service life by leveling the degree of wear (aging) of the elements. As a result of the research, a circuit was developed and an experimental sample of the specified wireless charging system was manufactured. When synthesizing the circuit, the task was to minimize the number of components in the power circuits in order to reduce the mass of the system and its cost. The maximum power of the experimental wireless charging system exceeds 100 Watts (25 V · 4 A) and is somewhat excessive for an on-board battery with a capacity of 1,500 mAh. Forced cooling of the receiving part is not required. The weight of the receiving part mounted on an unmanned aerial vehicle is 79 g (40 g is the receiving coil and 39 g is the electronics unit) and has reserves for reduction by reducing the cross-section of the receiving coil conductors, using a textolite with a lower thickness in the electronics unit, sealing the installation and using a two-sided arrangement of components. Laboratory tests have been carried out, confirming the operability of the proposed technical solutions, and the effectiveness of balancing during charging has been evaluated. In order to evaluate the effectiveness of the balancing system during the experiments, the output resistance of the receiver ($\partial U/\partial I$) was calculated relative to one of the elements of the on-board battery when the voltage on it changes. The result was 1.9 ohms with a charge current of 0.8 A (6S 1500 mAh battery).

Wireless charging; air-core transformer; battery balancing; synchronous rectification; resonant transformer.

Введение. Современные направления развития технологий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предполагают увеличение степени их автономности. Одна из задач, которую необходимо решать на этом пути, – организация зарядки бортовой аккумуляторной батареи (АКБ) БПЛА в автоматическом режиме. Наиболее удобно зарядку АКБ осуществлять с применением беспроводной передачи энергии. Работы в этом направлении ведутся многими командами исследователей и разработчиков, проводятся эксперименты с использованием разных способов беспроводной передачи энергии с наземной станции на БПЛА. Известны системы, использующие передачу энергии в виде СВЧ луча [1–4], луча лазера [5, 6], имеющие дальность до нескольких км. Преимуществами систем «дальнего» поля является дальность действия и возможность одновременной передачи данных в луче, однако они имеют ряд серьезных фундаментальных недостатков: довольно низкая эффективность передачи, проблемы с безопасностью эксплуатации.

Другой класс систем беспроводной передачи энергии – системы «ближнего» поля – используют емкостную [7–14] или индуктивную связь [15], а также связанные резонансные контуры [16]. Дальность действия таких систем обычно не превышает нескольких метров для резонансных, нескольких десятков см для индуктивно-связанных и нескольких мм для емкостно-связанных. Емкостно-связанные системы пока не находят широкого распространения из-за большей напряженности электрического и магнитного полей по сравнению с индуктивно-связанными системами [17, 18].

Имеются и другие способы зарядки батарей, использующие иные физические принципы, например, использование восходящих потоков и порывов ветра [19, 20], интеграция солнечных панелей в конструкцию БПЛА [21] и даже применение сбрасываемых батарей [22].

Постановка задачи. При решении задачи создания системы беспроводной передачи энергии для зарядки АКБ основными целями обычно являются минимизация потерь, снижение массы и габаритов системы (особенно приемной части, устанавливаемой на БПЛА). Между тем, при зарядке литиевых батарей необходимо пристальное внимание уделять балансировке напряжений их элементов, поскольку перезаряд отдельного элемента может привести к выходу из строя всей батареи (иногда и к возгоранию – из-за большой удельной энергии элементов на основе лития). Балансировка желательна также и при работе батареи на нагрузку, особенно нестационарную и с большой пиковой мощностью – для предотвращения глубокого разряда отдельных элементов, что также может привести к серьезному отказу. Исходя из этого, балансировка напряжений элементов бортовой АКБ БПЛА является актуальной задачей, позволяет повысить безопасность и продлить срок эксплуатации АКБ.

Изложение основного материала. Авторами предложен вариант построения системы беспроводной зарядки АКБ БПЛА с функцией балансировки напряжений элементов, а также с возможностью выполнения балансировки также и в полете. При синтезе схемы ставилась задача минимизации количества компонентов в силовых цепях с целью уменьшения массы системы и ее стоимости. Создан и опробован экспериментальный образец описанной далее системы.

Схема передающей части системы представлена на рис. 1 и является дальнейшим развитием работы [23].

Силовая часть передатчика состоит из полумоста на транзисторах VT1, VT2, нагруженного на передающий контур C_TX, L_TX. Конденсаторы C1 – C3 – блокировочные по переменному току. Блок управления содержит однокристалльный микроконтроллер (в экспериментальном образце применен STM32F030F4P6), драйвер управления полумостом (применен IRS2186S) и цепи согласования. Предусмотрено измерение напряжения источника питания и выходного тока полумоста (с помощью трансформатора тока СТ1). Программное обеспечение контроллера обеспечивает регулирование частоты переключения полумоста VT1VT2, измерение полного и активного тока контура, ограничение полного тока контура и регулирование активной мощности. Максимальная выходная мощность экспериментального образца передатчика составляет более 200 Вт при напряжении питания 24 В. В качестве VT1, VT2 применены IRFB3307Z, установленные на те-

плоотводе. В передающем контуре $C_{TX} = 0,33$ мкФ, $L_{TX} = 15$ мкГн (воздушная катушка диаметром 300 мм). Передающая часть системы каких-либо специальных особенностей не имеет.

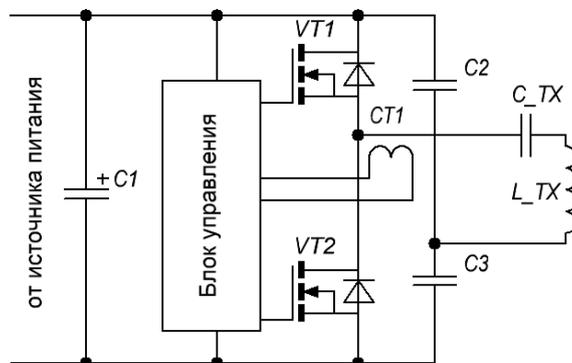


Рис. 1. Схема передающей части системы беспроводной зарядки

Схема приемной части системы для 6-элементной батареи приведена на рис. 2. Принцип построения, использованный в схеме балансировки, является модифицированным вариантом [24].

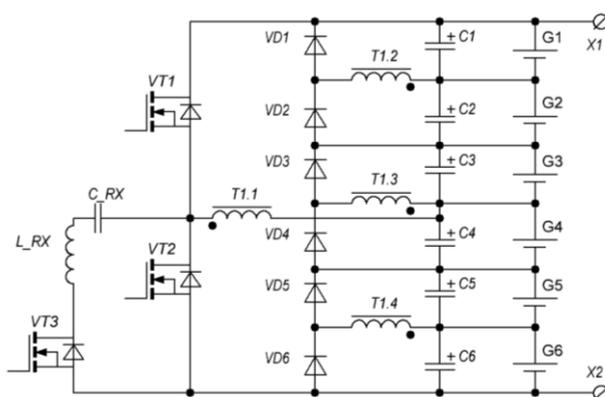


Рис. 2. Схема приемной части системы беспроводной зарядки с активной балансировкой

При работе в режиме беспроводной зарядки транзистор VT3 открыт, VT1, VT2 закрыты. Переменный ток последовательного контура L_{RX} , C_{RX} замыкается через открытый канал VT3, обратные диоды VT1, VT2, обмотку T1.1 и конденсаторы C4 – C6 (имеющие на рабочей частоте системы практически нулевой импеданс). Заряд всех элементов АКБ осуществляется двумя путями: основной – через обратные диоды VT1 и VT2 и дополнительный – от обмоток T1.2 – T1.4 через выпрямители VD1 – VD6, C1 – C6, при этом на обмотке T1.1 действует то же переменное напряжение, что и на входе основного выпрямителя. Поскольку числа витков обмоток T1.2 – T1.4 одинаковы и эти обмотки имеют хорошую магнитную связь, происходит заряд с балансировкой напряжений на элементах АКБ. Элементы с меньшим напряжением будут заряжаться большим током и наоборот. При этом для снижения потерь мощности в выпрямителях и повышения эффективности балансировки в качестве диодов VD1 – VD6 применены диоды Шоттки с малым падением напряжения (в экспериментальном образце установлены SS34). Следует заметить, что кажущаяся на первый взгляд заманчивой идея применить в качестве VD1 – VD6 сборки синхронных выпрямителей (например, DK5V45R10), содержащие полевой MOSFET транзистор и схему управления его затвором, неэффективна, поскольку из-за небольшой разницы между ЭДС обмоток и напряжением

элементов АКБ не гарантируется устойчивое переключение транзистора синхронного выпрямителя. Как следствие, будет наблюдаться неустойчивая работа схемы балансировки с возможными автоколебательными процессами из-за магнитной связи обмоток. Применение же сборок синхронного выпрямления эффективно в основном канале – путем их включения параллельно с VT1 и VT2. Так, упомянутая выше DK5V45R10 имеет сопротивление канала 10 мОм, а это означает, что падение напряжения на такой микросборке при токах до 10 А составляет всего 0,1–0,2 В, что существенно ниже, чем даже на специализированных диодах Шоттки.

При необходимости балансировки элементов АКБ в полете транзистор VT3 запирается, а полумост VT1 – VT2 начинает работу с коэффициентом заполнения около 50 %. На обмотке T1.1 появляется напряжение прямоугольной формы с амплитудой, равной сумме трех напряжений элементов АКБ (G1 – G3 или G4 – G6). Число витков обмотки T1.1 в 3 раза больше, чем число витков T1.2 – T1.4, это обязательное условие. Далее происходят два процесса: при неравенстве сумм напряжений элементов G1 – G3 и G4 – G6 в обмотке T1.1 появляется постоянная составляющая тока, которая обеспечивает выравнивание этих суммарных напряжений. Кроме этого, балансировка отдельных элементов также имеет место благодаря работе выпрямителей VD1 – VD6. Ограничение постоянной составляющей тока в T1.1 осуществлено за счет выбора транзисторов VT1, VT2 с соответствующим сопротивлением канала (в экспериментальном образце – 0,4 Ом, применены AOD11S60). Параллельно VT1 и VT2 установлены сборки DK5V45R10 (см. выше).

Для оценки эффективности системы балансировки в ходе экспериментов осуществлен расчет выходного сопротивления приемника ($\partial U/\partial I$) относительно одного из элементов АКБ при изменении напряжения на нем. Результат составил 1,9 Ом при токе заряда 0,8 А (батарея 6S 1500 мА·ч). При отключении обмотки T1.1 выходное сопротивление приемника стремится к бесконечности (т.е. изменение напряжения на одном из элементов АКБ не приводит к изменению его тока заряда).

В приемной части экспериментального образца системы трансформатор выполнен на ферритовом кольце T18×12×8; управление VT1, VT2 осуществлено от специализированного драйвера IR2153S с автогенератором и функцией отключения. Приемная катушка использовалась диаметром 300 мм, без сердечника, с индуктивностью 15 мкГн. Резонансный конденсатор C_RX – силовой металлопленочный типа МКРН, емкостью 0,33 мкФ.

Выводы. Предложено схемное решение системы беспроводной зарядки с функцией балансировки напряжений элементов заряжаемой батареи. Изготовлен экспериментальный образец системы, проведено опробование, показавшее работоспособность предложенных технических решений. Максимальная мощность экспериментальной системы беспроводной зарядки превышает 100 Вт (25 В 4 А) и для примененного АКБ емкостью 1500 мА·ч является несколько избыточной. Принудительного охлаждения приемной части не требуется. Масса приемной части, устанавливаемой на БПЛА, составляет 79 г (40 г – приемная катушка и 39 г – блок электроники) и имеет резервы для уменьшения за счет снижения сечения проводников приемной катушки, применения в блоке электроники текстолита с меньшей толщиной, уплотнения монтажа и применения двустороннего расположения компонентов.

Дальнейшим направлением работы является интеграция системы зарядки с полетным контроллером БПЛА с целью обеспечения контроля напряжения АКБ, управления процессом зарядки путем обмена информацией с зарядной станцией (способы могут быть различными), автоматического поиска и посадки на зарядную станцию. Решение этой задачи позволит приблизиться к созданию комплекса оборудования, обеспечивающего автономную работу БПЛА с автоматической зарядкой его АКБ. Это даст возможность расширить спектр задач, для решения которых в настоящее время используются БПЛА.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FRRG-2023-0011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chen R., Lee, and Y., Sun J.* Design and experiment of a loop rectenna for rfid wireless power transmission and data communication applications // Proceedings of the PIERS, Beijing, China. – 2009. – Vol. 2327. – P. 528531.
2. *Costanzo A. and Masotti D.* Energizing 5g: Near-and far-field wireless energy and data trantransfer as an enabling technology for the 5g iot // IEEE Microwave Magazine. – 2017. – Vol. 18, No. 3. – P. 125-136.
3. *Garnica J., Chinga R.A., and Lin J.* Wireless power transmission: From far field to near field // Proceedings of the IEEE. – 2013. – Vol. 101, No. 6. – P. 1321-1331.
4. *Li K.-R., See K.-Y., Koh W.-J., and Zhang J.-W.* ‘Design of 2.45 GHz microwave wireless power transfer system for battery charging applications // in Proc. Prog. Electromagn. Res. Symp.-Fall (PIERS-FALL). – Nov. 2017. – P. 2417-2423.
5. *Ouyang J., Che Y., Xu J., and Wu K.* Throughput maximization for laser-powered uav wireless communication systems // in 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). – IEEE, 2018. – P. 1-6.
6. *Iyer V., Bayati E., Nandakumar R., Majumdar A., and Gollakota S.* ‘Charging a smartphone across a room using lasers // Proc. ACM Interact., Mobile, Wearable Ubiquitous Technol. – Jan. 2018. – Vol. 1, No. 4. – P. 1-21.
7. *Huang L., Hu A.P., Swain A., Kim S., and Ren Y.* An overview of capacitively coupled power transfer – a new contactless power transfer solution // in 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – IEEE, 2013. – P. 461-465.
8. *Raciti A., Rizzo S.A., and Susinni G.* Drone charging stations over the buildings based on a wireless power transfer system // in 2018 IEEE/IAS 54th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). – IEEE, 2018. – P. 1-6.
9. *Aldhafer S., Mitcheson P.D., Arteaga J.M., Kkelis G., and Yates D.C.* Light-weight wireless power transfer for mid-air charging of drones // in 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). – IEEE, 2017. – P. 336-340.
10. *Vincent D., Huynh P.S., Patnaik L., and Williamson S.S.* Prospects of capacitive wireless power transfer (c-wpt) for unmanned aerial vehicles // in 2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow). – IEEE, 2018. – P. 1-5.
11. *Koruprolu A., Nag S., Erfani R., and Mohseni P.* Capacitive wireless power and data transfer for implantable medical devices // in 2018 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS). – IEEE, 2018. – P. 1-4.
12. *Yao Y., Wang Y., Liu X., Cheng H., Liu M., and Xu D.* Analysis, design, and implementation of a wireless power and data transmission system using capacitive coupling and double-sided lcc compensation topology // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2018. – Vol. 55, No. 1. – P. 541-551.
13. *Li Y. and Stevens C.J.* ‘Capacitor connected grids for wireless power transfer // in Proc. IEEE Wireless Power Transf. Conf., May 2014. – P. 122-125.
14. *Minnaert B., Matri F., Mongiardo M., Costanzo A., and Stevens N.* Constant capacitive wireless power transfer at variable coupling // in IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., May 2018. – P. 1-4.
15. *Ustun D., Balci S., and Sabanci K.* A parametric simulation of the wireless power transfer with inductive coupling for electric vehicles, and modelling with artificial bee colony algorithm // Measurement. – Jan. 2020. – Vol. 150. – Art. no. 107082.
16. *Shi Y., Zhang Y., Shen M., Fan Y., Wang C., and Wang M.* Design of a novel receiving structure for wireless power transfer with the enhancement of magnetic coupling // AEU-Int. J. Electron. Commun. – Oct. 2018. – Vol. 95. – P. 236-241.
17. *Dai J. and Ludois D.C.* Wireless electric vehicle charging via capacitive power transfer through a conformal bumper // in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), Mar. 2015. – P. 3307-3313.
18. *Lu F., Zhang H., and Mi C.* A review on the recent development of capacitive wireless power transfer technology // Energies. – Nov. 2017. – Vol. 10, No. 11. – P. 1752.
19. *Deitert M., Richards A., Toomer C.A., and Pipe A.* Engineless unmanned aerial vehicle propulsion by dynamic soaring // J. Guid., Control, Dyn. – Sep. 2009. – Vol. 32, No. 5. – P. 1446-1457.
20. *Richardson P.L.* Upwind dynamic soaring of albatrosses and UAVs // Prog. Oceanogr. – Jan. 2015. – Vol. 130. – P. 146-156.
21. *Malaver A., Motta N., Corke P., and Gonzalez F.* Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases // Sensors. – Feb. 2015. – Vol. 15, No. 2. – P. 4072-4096.
22. *Galkin B., Kibilda J., and DaSilva L.A.* UAVs as mobile infrastructure: Addressing battery lifetime // IEEE Commun. Mag. – Jun. 2019. – Vol. 57, No. 6. – P. 132-137.

23. Бурлака В.В., Гулаков С.В., Головин А.Ю., Мироненко Д.С. Система беспроводной передачи электрической энергии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 5 (235). – С. 174-182.
24. Moghaddam Farzan A. and Van den Bossche A. A single transformer for active cell equalization method of lithium-ion batteries with two times fewer secondaries than cells // *Electronics*. – 2019. – Vol. 8, No. 9. – Art. no. 951.

REFERENCES

1. Chen R., Lee, and Y., Sun J. Design and experiment of a loop rectenna for rfid wireless power transmission and data communication applications, *Proceedings of the PIERS, Beijing, China*, 2009, Vol. 2327, pp. 528531.
2. Costanzo A. and Masotti D. Energizing 5g: Near-and far-field wireless energy and data transfer as an enabling technology for the 5g iot, *IEEE Microwave Magazine*, 2017, Vol. 18, No. 3, pp. 125-136.
3. Garnica J., Chinga R.A., and Lin J. Wireless power transmission: From far field to near field, *Proceedings of the IEEE*, 2013, Vol. 101, No. 6, pp. 1321-1331.
4. Li K.-Y., See K.-Y., Koh W.-J., and Zhang J.-W. 'Design of 2.45 GHz microwave wireless power transfer system for battery charging applications, in *Proc. Prog. Electromagn. Res. Symp.-Fall (PIERS-FALL)*, Nov. 2017, pp. 2417-2423.
5. Ouyang J., Che Y., Xu J., and Wu K. Throughput maximization for laser-powered uav wireless communication systems, in *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. IEEE, 2018, pp. 1-6.
6. Iyer V., Bayati E., Nandakumar R., Majumdar A., and Gollakota S. 'Charging a smartphone across a room using lasers, *Proc. ACM Interact., Mobile, Wearable Ubiquitous Technol.*, Jan. 2018, Vol. 1, No. 4, pp. 1-21.
7. Huang L., Hu A.P., Swain A., Kim S., and Ren Y. An overview of capacitively coupled power transfer – a new contactless power transfer solution, in *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE, 2013, pp. 461-465.
8. Raciti A., Rizzo S.A., and Susinni G. Drone charging stations over the buildings based on a wireless power transfer system, in *2018 IEEE/IAS 54th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*. IEEE, 2018, pp. 1-6.
9. Aldhafer S., Mitcheson P.D., Arteaga J.M., Kkelis G., and Yates D.C. Light-weight wireless power transfer for mid-air charging of drones, in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. IEEE, 2017, pp. 336-340.
10. Vincent D., Huynh P.S., Patnaik L., and Williamson S.S. Prospects of capacitive wireless power transfer (c-wpt) for unmanned aerial vehicles, in *2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow)*. IEEE, 2018, pp. 1-5.
11. Koruprolu A., Nag S., Erfani R., and Mohseni P. Capacitive wireless power and data transfer for implantable medical devices, in *2018 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*. IEEE, 2018, pp. 1-4.
12. Yao Y., Wang Y., Liu X., Cheng H., Liu M., and Xu D. Analysis, design, and implementation of a wireless power and data transmission system using capacitive coupling and double-sided lcc compensation topology, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, Vol. 55, No. 1, pp. 541-551.
13. Li Y. and Stevens C.J. 'Capacitor connected grids for wireless power transfer, in *Proc. IEEE Wireless Power Transf. Conf., May 2014*, pp. 122-125.
14. Minnaert B., Matri F., Mongiardo M., Costanzo A., and Stevens N. Constant capacitive wireless power transfer at variable coupling, in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., May 2018*, pp. 1-4.
15. Ustun D., Balci S., and Sabanci K. A parametric simulation of the wireless power transfer with inductive coupling for electric vehicles, and modelling with artificial bee colony algorithm, *Measurement*, Jan. 2020, Vol. 150, Art. no. 107082.
16. Shi Y., Zhang Y., Shen M., Fan Y., Wang C., and Wang M. Design of a novel receiving structure for wireless power transfer with the enhancement of magnetic coupling, *AEU-Int. J. Electron. Commun.*, Oct. 2018, Vol. 95, pp. 236-241.
17. Dai J. and Ludois D.C. Wireless electric vehicle charging via capacitive power transfer through a conformal bumper, in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), Mar. 2015*, pp. 3307-3313.
18. Lu F., Zhang H., and Mi C. A review on the recent development of capacitive wireless power transfer technology, *Energies*, Nov. 2017, Vol. 10, No. 11, pp. 1752.
19. Deittert M., Richards A., Toomer C.A., and Pipe A. Engineless unmanned aerial vehicle propulsion by dynamic soaring, *J. Guid., Control, Dyn.*, Sep. 2009, Vol. 32, No. 5, pp. 1446-1457.
20. Richardson P.L. Upwind dynamic soaring of albatrosses and UAVs, *Prog. Oceanogr.*, Jan. 2015, Vol. 130, pp. 146-156.

21. Malaver A., Motta N., Corke P., and Gonzalez F. Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases, *Sensors*, Feb. 2015, Vol. 15, No. 2, pp. 4072-4096.
22. Galkin B., Kibilda J., and DaSilva L.A. UAVs as mobile infrastructure: Addressing battery lifetime, *IEEE Commun. Mag.*, Jun. 2019, Vol. 57, No. 6, pp. 132-137.
23. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Golovin A.Yu., Mironenko D.S. Sistema besprovodnoy peredachi elektricheskoy energii [Wireless electric power transmission system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 5 (235), pp. 174-182.
24. Moghaddam Farzan A. and Van den Bossche A. A single transformer for active cell equalization method of lithium-ion batteries with two times fewer secondaries than cells, *Electronics*, 2019, Vol. 8, No. 9, Art. no. 951.

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 – e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; тел.: +79497298638; научно-технический центр силовой электроники; д.т.н.; профессор.

Головин Андрей Юрьевич – e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; тел.: +79497128054; научно-технический центр силовой электроники; мл. науч. сотрудник.

Мироненко Дмитрий Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89885153109; 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 – e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; phone: +79497298638; Scientific and Technical Center for Power Electronics; dr. of eng. sc.; professor.

Golovin Andrey Yurievich – e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; 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.

УДК 620.3

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-273-280

Е.А. Лахина, Н.Е. Черненко, Н.А. Шандыба, С.В. Балакирев, М.С. Солодовник

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОТЖИГА ПОДЛОЖКИ GaAs(111)
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОУГЛУБЛЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ
ФОКУСИРОВАННЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ВРЕМЕНИ
ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов формирования углублений методом фокусированных ионных пучков на подложках GaAs(111) и их последующей трансформации в процессе отжига в сверхвысоковакуумной камере молекулярно-лучевой эпитаксии в потоке мышьяка и в его отсутствие. Установлено, что при времени воздействия ионного пучка, равного 1 мс, процессы накопления ионов в подложке преобладают над процессами распыления материала, тогда как при времени, равном 5 мс, происходит интенсивное распыление материала подложки в точках воздействия ионного пучка с увеличением глубины вытравливаемых участков при повышении числа проходов. После отжига подложек с участками, модифицированными фокусированным ионным пучком, углубления значительно увеличиваются в размерах в результате процессов локального капельного травления. Исследования показали, что размеры углублений после отжига в потоке мышьяка превышают размеры углублений после отжига в отсутствие потока

мышьяка почти во всем диапазоне чисел проходов ионного пучка. Зависимости глубины и латерального размера углублений от числа проходов ионного пучка имеют немонотонный характер, обусловленный конкуренцией процессов капельного травления и кристаллизации областей, модифицированных ионным пучком, в потоке мышьяка. Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что для получения высокосимметричных пирамидальных углублений с низкой поверхностной плотностью требуется создание на поверхности GaAs(111) массива точек обработки фокусированного ионного пучка с интервалом 2 мкм при времени воздействия 5 мс и количестве проходов, равном 40. На следующем этапе необходима трансформация точек обработки ионного пучка в углубления пирамидальной формы посредством отжига подложки в камере молекулярно-лучевой эпитаксии при температуре 600°C и временном интервале 60 минут. Предложенная в работе методика, основанная на комбинации процессов ионно-лучевой обработки поверхности и молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяет получить наноглубления с требуемой симметрией, которые в дальнейшем могут служить центрами зарождения квантовых точек InAs с заданными свойствами.

Нанотехнологии; наноструктуры; наноматериалы; полупроводники; молекулярно-лучевая эпитаксия; арсенид галлия; поток мышьяка; фокусированный ионный пучок; отжиг; GaAs(111).

E.A. Lakhina, N.E. Chernenko, N.A. Shandyba, S.V. Balakirev, M.S. Solodovnik

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ANNEALING MODES OF THE GAAS(111) SURFACE ON THE CHARACTERISTICS OF NANOHOLE FORMED BY FOCUSED ION BEAMS AT VARIOUS EXPOSURE TIMES

The paper presents the results of experimental studies of the processes of formation of holes by the method of focused ion beams on GaAs(111) substrates and their subsequent transformation during annealing in an ultrahigh vacuum chamber of molecular beam epitaxy in an arsenic flux and in its absence. It was found that at an ion beam exposure time of 1 ms, the processes of ion accumulation in the substrate prevail over the processes of the material sputtering, whereas at an exposure time of 5 ms, intensive sputtering of the substrate material occurs at the points of exposure to the ion beam with an increase in the depth of the etched areas with an increase in the number of ion beam passes. After annealing of substrates with ion beam-modified areas, the holes increase significantly in size as a result of local droplet etching processes. Studies showed that the hole size after annealing in the arsenic flux exceeds the hole size after annealing in the absence of an arsenic flux in almost the entire range of the number of ion beam passes. The dependences of the depth and lateral size of the holes on the number of ion beam passes are non-monotonic, due to the competition of the processes of droplet etching and crystallization of ion beam-modified areas in the arsenic flux. The results of experimental studies show that to obtain highly symmetric pyramidal holes with low surface density, it is required to create on the GaAs(111) surface an array of focused ion beam treatment points with an interval of 2 μm at an exposure time of 5 ms and a number of passes equal to 40. At the next stage, it is necessary to transform the ion beam processing points into pyramidal-shaped holes by annealing the substrate in a molecular beam epitaxy chamber at a temperature of 600°C and a time interval of 60 minutes. The technique proposed in this work, based on the combination of ion-beam surface treatment and molecular beam epitaxy, makes it possible to obtain nanoholes with the required symmetry, which can further serve as nucleation centers for InAs quantum dots with the desired properties.

Nanotechnology; nanostructures; nanomaterials; semiconductors; molecular beam epitaxy; gallium arsenide; arsenic flux; focused ion beam; annealing; GaAs(111).

Введение. Актуальность исследования геометрических характеристик углублений, сформированных с применением методик фокусированных ионных пучков (ФИП) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), связана с источниками одиночных и запутанных фотонов [1, 2] и обусловлена потенциалом квантовых точек (КТ), которые могут быть сформированы в углублениях и в дальнейшем использованы в сферах квантовой коммуникации и вычислений [3, 4]. Примечательно, что КТ с симметрией C_{3v} , выращиваемые на подложках GaAs с ориентацией (111) [5, 6], обладают минимальным расщеплением тонкой структуры, позволяющим повысить эффективность генерации запутанных фотонных пар [7–9]. Ключевые свойства КТ зависят от точности эпитаксиальной технологии, требующей понимания физических процессов, сопутствующих росту [10, 11]. Не менее важен выбор способа предварительной модификации поверхности. Традицион-

ная фотолитография не позволяет обеспечить высокое разрешение структурирования поверхности и имеет трудности в совмещении фотошаблона и образца [12]. Электронно-лучевая литография обладает более высоким разрешением, однако отличается очень низкой производительностью [13, 14]. При этом при использовании обоих методов поверхность будет химически загрязнена, что негативно сказывается на свойствах КТ. В то же время метод ФИП позволяет с высокой точностью регулировать начальные параметры углублений, в которых возможно дальнейшее формирование КТ, а также исключает наличие химических реагентов в технологическом процессе. Этот подход, в комбинации с МЛЭ, может применяться для самоорганизации высокоупорядоченных КТ InAs, обеспечивая при этом их высокое оптическое качество.

Анализ данных по воздействию на структуру обработки ионными пучками с последующим восстановлением в разных условиях МЛЭ в литературе отсутствует несмотря на увеличивающийся интерес к поверхности с ориентацией (111) [15, 16]. В данной работе проводится исследование влияния режимов локального капельного травления при отжиге подложек GaAs(111) на изменение формы и размера наноглублений, предварительно сформированных ФИП. В частности, проводится анализ изменения характеристик углублений после ионной модификации, которые зависят от количества проходов ионного пучка и времени его воздействия на поверхность, а также отжига в камере МЛЭ при различных параметрах.

Описание эксперимента. В начале эксперимента поверхность подложки подверглась воздействию ФИП, которым оснащен растровый электронный микроскоп (РЭМ) Nova NanoLab 600, при ускоряющем напряжении 5 кВ и различном времени воздействия ионов Ga^+ на поверхность подложки GaAs(111): 1 мс и 5 мс. Размер модифицированной области составил 5×5 мкм, при этом расстояние между сформировавшимися углублениями 2 мкм, а количество проходов ионного пучка (N) изменялось от 1 до 60. Данным методом были получены образцы, которые в дальнейшем были помещены в камеру МЛЭ SemiTEq STE35, оснащенную источниками III и V группы [17, 18]. Образец 1 отжигался в камере МЛЭ в отсутствие потока мышьяка до начала схода естественного окисла, образец 2 – в потоке мышьяка до начала схода окисла, после чего каждый из образцов отжигался в потоке мышьяка при температуре $600^\circ C$ и временном интервале в 60 минут. Полученные образцы были исследованы с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NT-MDT NTegra в полуконтактном режиме.

Результаты и обсуждение. В ходе проведенного исследования были получены данные о состоянии модифицированной поверхности GaAs(111). По результатам АСМ-исследования выявлено, что форма углублений до отжига практически не изменяется при изменении N и времени воздействия ионного пучка (рис. 1). На рис. 1 видно, что с увеличением времени воздействия ионного пучка увеличивается глубина наноглублений. Также при повышении времени воздействия с 1 до 5 мс на поверхности появляется ярко выраженный ореол вокруг углублений (рис. 1,б). Ореол образуется в результате накопления ионов и перераспределения материала подложки во время ФИП-обработки. Также на АСМ-изображениях поверхности, полученной в результате ФИП-обработки без последующего отжига видны светлые области в виде частиц (рис. 1а,б), которые образуются в результате скайбирования подложки GaAs.

При увеличении N до 40 наблюдается увеличение глубины (рис. 2): для $N=10$ и $N=40$ максимальная глубина имеет значение 1,8 и 7,3 нм соответственно. Стоит также отметить, что латеральный размер увеличивается с увеличением времени воздействия с 1 мс до 5 мс и с увеличением N (рис. 2,в). При времени воздействия 1 мс в точках воздействия ФИП наблюдаются возвышения, окруженные узким ореолом (рис. 2,а), тогда как при 5 мс в точках воздействия формируются углубления без возвышений (рис. 2,б). Несмотря на то, что и время воздействия пучка, и число проходов увеличивают дозу ионного облучения, в случае 1 мс материал накапливается в точках воздействия с увеличением числа проходов, тогда как в случае 5 мс материал распыляется, образуя углубления. Следовательно, для обеспечения высокой степени распыления материала и его преобладания перед накоплением необходимо непрерывное воздействие ФИП в течение 5 мс для каждого прохода пучка.

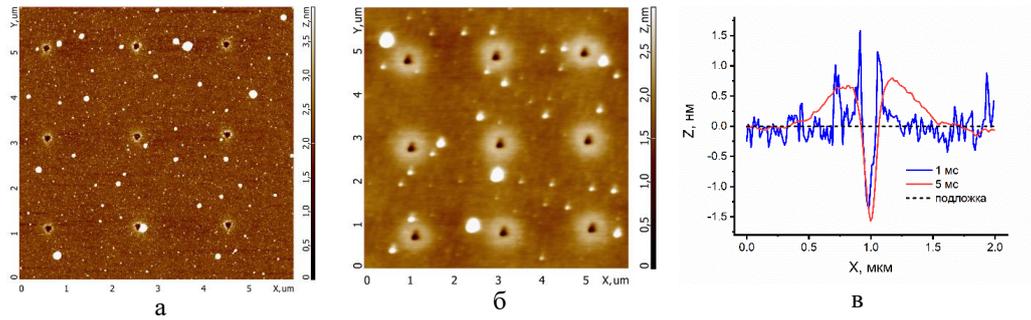


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности образца после ФИП-модификации до отжига при количестве проходов ионного пучка $N=10$ при времени воздействия 1 мс (а) и 5 мс (б); профили центральных углублений относительно уровня подложки (в)

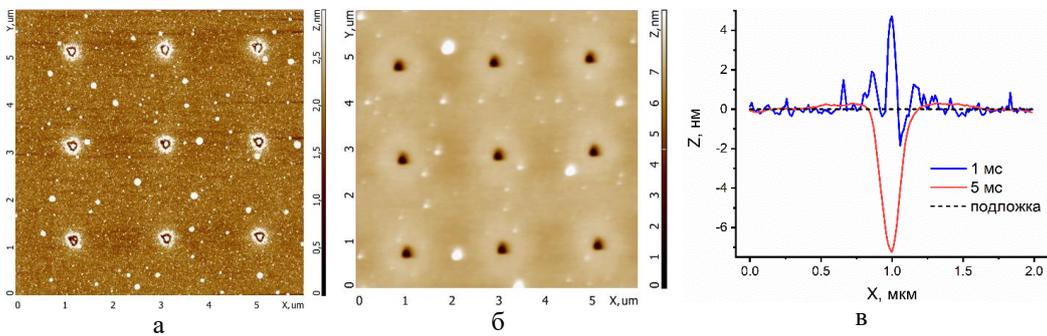


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности образца после ФИП-модификации до отжига при количестве проходов ионного пучка $N=40$ при времени воздействия 1 мс (а) и 5 мс (б); профили центральных углублений относительно уровня подложки (в)

АСМ-исследования поверхности ФИП-модифицированной подложки, подверженной отжигу в камере МЛЭ, показали, что поверхность за пределами областей модификации стала гладкой без видимых дефектов (рис. 3,а,б). Углубления приобрели форму равностороннего треугольника, что связано с кристаллографической ориентацией подложки GaAs(111) [19–21].

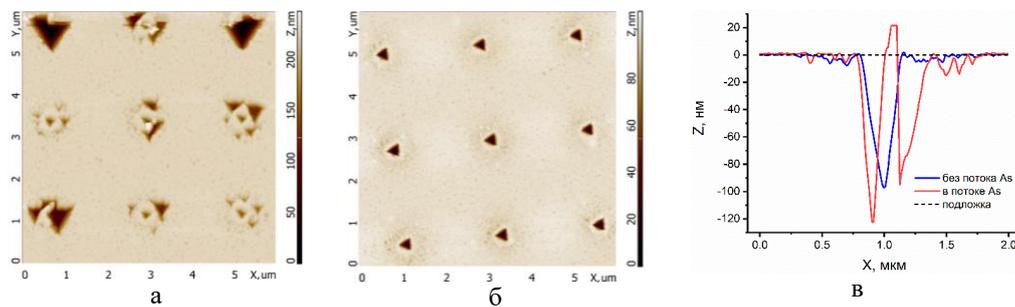


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности образца после ФИП-модификации при количестве проходов ионного пучка $N=10$ при времени воздействия 5 мс после отжига в потоке мышьяка (а) и без потока мышьяка (б); профили центральных углублений относительно уровня подложки (в)

Как видно из рис. 3, на образце, полученном в присутствии потока As, углубления не имеют четкой формы, что связано с процессами кристаллизации и перераспределения материала. При $N=10$ для образца 2 и образца 1 максимальная глубина имеет значение 122,1 и

97,2 нм соответственно. С увеличением N до 40 уменьшилась глубина наноглублений (рис. 4,в), которая теперь становится равной 99 нм для образцов 1 и 2. Латеральный размер полученных углублений на 70 нм больше для образца 1 и равен 0,45 мкм. Следует также отметить, что при увеличении N все углубления приобрели форму равностороннего треугольника.

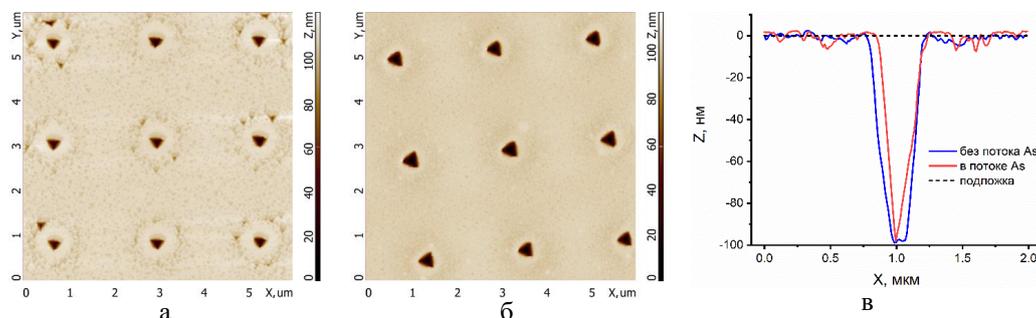


Рис. 4. АСМ-изображения поверхности образца после ФИП-модификации при количестве проходов ионного пучка $N=40$ при времени воздействия 5 мс после отжига в потоке мышьяка (а) и без потока мышьяка (б); профили центральных углублений относительно уровня подложки (в)

Для оценки влияния количества проходов и времени воздействия на изменение параметров углублений, были построены зависимости их глубины и латерального размера углублений от количества проходов ионного пучка (рис. 5). Из анализа полученных графиков следует, что как глубина, так и латеральный размер углублений при отжиге в потоке мышьяка достигают максимума при 5 проходах ФИП в случае времени воздействия 5 мс и при 30 проходах в случае 1 мс (рис. 5,б).

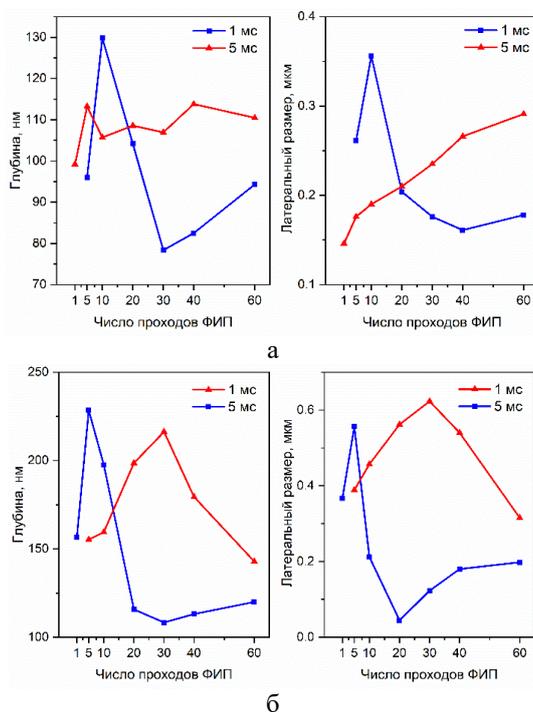


Рис. 5. Зависимости диаметра и латерального размера углублений от количества проходов ионного пучка для образцов, полученных после отжига в отсутствие потока мышьяка (а) и в присутствии потока мышьяка (б) при различном времени взаимодействия: 1 мс и 5 мс

В диапазоне от 20 до 60 проходов ФИП глубина и латеральный размер углублений выше при 1 мс, что связано со снижением дозы ионного облучения и объема материала, который в случае 5 мс задерживается в областях воздействия ФИП и снижает размеры углублений (рис. 5,б). При отжиге в отсутствие потока мышьяка ситуация несколько иная: при 1 мс максимум достигается при 10 проходах ФИП, а в диапазоне от 20 до 60 проходов значения и глубины и латерального размера углублений при 5 мс превышают значения при 1 мс несмотря на большую дозу ионного облучения (рис. 5,а). Данное поведение связано с меньшей интенсивностью локального капельного травления в случае отжига в отсутствие потока мышьяка. В то же время, в потоке мышьяка интенсивность травления ФИП-модифицированных участков возрастает за счет усиления диффузии атомов галлия из области воздействия ФИП. В свою очередь, этот процесс конкурирует с кристаллизацией скоплений галлия в потоке мышьяка, приводящей к увеличению объема материала в области воздействия ФИП и соответствующему снижению глубины и латерального размера конечных углублений, объясняющему немонотонность зависимостей, представленных на рис. 5. Степень преобладания одного процесса над другим в данном случае зависит как от потока мышьяка, так и от температуры, при которой происходит термический срыв окисла. В связи с тем, что в присутствии потока мышьяка сход окисла происходит при более высокой температуре, чем в его отсутствие, отток атомов галлия из-под оксидного слоя, покрывающего ФИП-модифицированный участок, происходит на протяжении большего времени, что объясняет увеличение размеров углублений, полученных в результате отжига в потоке мышьяка (рис. 5). Однако увеличение латерального размера углубления приводит к повышению вероятности срыва окисла в области воздействия ФИП, что при больших числах проходов ионного пучка приводит к снижению времени начала кристаллизации капель галлия и соответствующему снижению глубины и латерального размера углублений. Следовательно, в случае отжига в потоке мышьяка зависимость размеров углублений от числа проходов ФИП имеет ярко выраженный пик (рис. 5,б), в то время как в случае отжига в его отсутствие зависимость имеет более монотонный характер (рис. 5,а).

Выводы. В результате проведенных исследований было установлено, что поток мышьяка во время отжига подложки GaAs(111) оказывает значительное влияние на морфологию наноглублений, получаемых методом ФИП. Так, в потоке мышьяка возможно получение углублений большего латерального размера и глубины, чем в его отсутствие. Оптимальными параметрами для получения углублений с низкой поверхностной плотностью является предварительная обработка поверхности методом ФИП при расстоянии между углублениями 2 мкм, времени воздействия 5 мс и количестве проходов ионного пучка, равном 40. На следующем этапе необходимо проведение отжига подложки в камере МЛЭ для получения высокосимметричных наноглублений при температуре 600°C и временном интервале 60 минут. Таким образом, предложенная в работе методика, основанная на комбинации ФИП-обработки поверхности и метода МЛЭ, позволяет получить наноглубления с требуемой симметрией, которые в дальнейшем могут служить центрами зарождения КТ InAs с заданными свойствами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10313, <https://rscf.ru/project/23-79-10313/>, в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Valeri M., Barigelli P., Polacchi B., Rodari G., Santis G., Giordan T., Carvacho G., Spagnolo N., Sciarrino F. Generation and characterization of polarization-entangled states using quantum dot single-photon sources, *Quantum Sci. Technol.*, 2024, Vol. 9 (2), pp. 025002.
2. da Silva S.F.C., Undeutsch G., Lehner B., Manna S., Krieger T., Reindl M., Schimpf C., Trotta R., Rastelli A. GaAs quantum dots grown by droplet etching epitaxy as quantum light sources, *Applied Physics Letters*. AIP Publishing LLC, 2021, Vol. 119 (12), pp. 120502.
3. Ahmadi A., Fognini A., E. Reimer M. Toward On-Demand Generation of Entangled Photon Pairs with a Quantum Dot, *Recent Advances in Nanophotonics - Fundamentals and Applications*. IntechOpen, 2020.

4. Vajner D.A., Holewa P., Zięba-Ostój E., Wasiluk M., von Helversen M., Sakanas A., Huck A., Yvind K., Gregersen N., Musiał A., Syperek M., Semenova E., Heindel T. On-Demand Generation of Indistinguishable Photons in the Telecom C-Band Using Quantum Dot Devices, *ACS Photonics*, 2024, Vol. 11 (2), pp. 339-347.
5. Zeuner K.D., Jöns K.D., Schweickert L., Reuterskiöld Hedlund C., Nuñez Lobato C., Lettner T., Wang K., Gyger S., Schöll E., Steinhauer S., Hammar M., Zwiller V. On-Demand Generation of Entangled Photon Pairs in the Telecom C-Band with InAs Quantum Dots, *ACS Photonics*, 2021, Vol. 8 (8), pp. 2337-2344.
6. von Helversen M., Haisler A.V., Daurtsev M.P., Dmitriev D.V., Toropov A.I., Rodt S., Haisler V.A., Derebezov I.A., Reitzenstein S. Triggered Single-Photon Emission of Resonantly Excited Quantum Dots Grown on (111)B GaAs Substrate, *Phys. status solidi – Rapid Res. Lett.*, 2022, Vol. 16 (8).
7. Tuktamyshev A., Fedorov A., Bietti S., Vichi S., Zeuner K. D., Jöns K. D., Chrastina D., Tsukamoto S., Zwiller V., Gurioli M., Sanguinetti S. Telecom-wavelength InAs QDs with low fine structure splitting grown by droplet epitaxy on GaAs(111)A vicinal substrates, *Appl. Phys. Lett.*, 2021, Vol. 118 (13).
8. Zieliński M. Vanishing fine structure splitting in highly asymmetric InAs/InP quantum dots without wetting layer, *Sci. Rep.*, 2020, Vol. 10, pp. 13542.
9. Świdorski M., Zieliński M. Electric field tuning of excitonic fine-structure splitting in asymmetric InAs/InP nanowire quantum dot molecules, *Phys. Rev. B*, 2019, Vol. 100, pp. 235417.
10. Pelucchi E. On the multifaceted journey for the invention of epitaxial quantum dots, *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.*, 2023, Vol. 69 (2–4), pp. 100603.
11. Lozano M.S., Gómez V.J. Epitaxial growth of crystal phase quantum dots in III–V semiconductor nanowires, *Nanoscale Adv.*, 2023, Vol. 5(7), pp. 1890-1909.
12. Nishimura Y. et al. Photolithography, *Flat Panel Display Manufacturing*. Wiley, 2018, pp. 287-310.
13. Pease R.F.W. Electron beam lithography, *Contemp. Phys.*, 1981, Vol. 22 (3), pp. 265-290.
14. Chen Y. Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: A review, *Microelectron. Eng.*, 2015, Vol. 135, pp. 57-72.
15. Mano T., Ohtake A., Kuroda T. Lattice-Mismatched Epitaxy of InAs on (111)A-Oriented Substrate: Metamorphic Layer Growth and Self-Assembly of Quantum Dots, *Phys. status solidi*, 2024.
16. Schliwa A. et al. In(Ga)As/GaAs quantum dots grown on a (111) surface as ideal sources of entangled photon pairs, *Phys. Rev. B*, 2009, Vol. 80 (16), pp. 161307.
17. Balakirev S.V., Solodovnik M.S., Eremenko M.M., Chernenko N.E., Ageev O.A. Anomalous behavior of In adatoms during droplet epitaxy on the AlGaAs surfaces, *Nanotechnology*, 2020, Vol. 31 (48), pp. 485604.
18. Balakirev S.V., Solodovnik M.S., Ageev O.A. Hybrid Analytical-Monte Carlo Model of In/GaAs(001) Droplet Epitaxy: Theory and Experiment, *Phys. status solidi*, 2018, Vol. 255 (4), pp. 1700360.
19. Xu H.Y. Effects of annealing and substrate orientation on epitaxial growth of GaAs on Si, *J. Appl. Phys.*, 2009, Vol. 106 (8).
20. Vina L., Wang W.I. AlGaAs/GaAs(111) heterostructures grown by molecular beam epitaxy, *Appl. Phys. Lett.*, 1986, Vol. 48 (1), pp. 36-37.
21. Schowalter L.J., Yang K., Thundat T. Atomic step organization in homoepitaxial growth on GaAs(111)B substrates, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 12, pp. 2579-2583.

Лакшина Екатерина Александровна – Южный федеральный университет; e-mail: lakhina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; техник-проектировщик.

Черненко Наталия Евгеньевна – e-mail: nchernenko@sfedu.ru; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; м.н.с.

Шандыба Никита Андреевич – e-mail: shandyba@sfedu.ru; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; м.н.с.

Балакирев Сергей Вячеславович – e-mail: sbalakirev@sfedu.ru; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Солодовник Максим Сергеевич – e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Lakhina Ekaterina Alexandrovna – Southern Federal University; e-mail: lakhina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371611; the Department of Nanotechnologies and Microsystems; technician designer.

Chernenko Natalia Evgenyevna – e-mail: nchernenko@sfedu.ru; phone: +78634371611; the Department of Nanotechnologies and Microsystems; junior research assistant.

Shandyba Nikita Andreyevich – e-mail: shandyba@sfedu.ru; phone: +78634371611; the Department of Nanotechnologies and Microsystems; junior research assistant.

Balakirev Sergey Vyacheslavovich – e-mail: sbalakirev@sfedu.ru; phone: +78634371611; the Department of Nanotechnologies and Microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Solodovnik Maxim Sergeevich – e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; phone: +78634371611; the Department of Nanotechnologies and Microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.31

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-280-291

А.В. Юдин, Ю.И. Юрасов, О.А. Беляк, П.С. Пляка, М.И. Толстунов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМОЛ ДЛЯ DLP 3D ПЕЧАТИ С ДОБАВКАМИ ПОРОШКОВ Al_2O_3 И ЦТС-19

Расширение спектра материалов, доступных для обработки аддитивными методами, представляет большой интерес для промышленности. Технологии, такие как 3D печать полимерами, значительно раздвигают границы возможностей при проектировании, позволяя совершить переход к устройствам нового поколения. В виду постепенного внедрения таких подходов на практике, новый импульс развития получило направление метаматериалов – объемных структур, геометрия которых позволяет более полно использовать свойства базового материала. В частности, керамики, распространенные в современной электронной технике, могут быть введены в формуемый аддитивным способом полимер в качестве функциональной добавки. Последующая термическая обработка таких составов позволяет получить макроструктурированный керамо-полимерный или чисто керамический каркас с уникальными пьезо- или диэлектрическими свойствами. Однако, частицы добавки могут значительно изменять технологические свойства базового материала, что необходимо учитывать. При этом вычленение эмпирических признаков, характеризующих эту динамику, является нетривиальной задачей. Так, в публикациях по УФ-отверждаемым композициям в качестве ведущего признака признается критерий вязкости состава. В то же время оптическая прозрачность, определяющая потребную мощность оборудования, не рассматривается должным образом. В этой связи в представленной работе проведено исследование вязкостных, диэлектрических, оптических и температурных свойств композиций на основе УФ-отверждаемой смолы для DLP 3D печати, содержащих добавки 5 об. % порошков Al_2O_3 и ЦТС-19. Представлен метод качественного экспресс-анализа технологической пригодности состава, основанный на скотч-тесте. Показано, что вязкость состава менее значима в сравнении с его оптической прозрачностью в УФ-диапазоне. Рассмотренные составы обладают температурной стабильностью вплоть до 300 °C. Введение порошковых добавок позволяет в 2,5 раза увеличить показатель диэлектрической проницаемости ϵ'/ϵ_0 и снизить диэлектрические потери в материале при его нагреве выше 110 °C. Показано, что композиты, содержащие оксид алюминия обладают потенциалом для применения в электронике.

Оксид алюминия Al_2O_3 ; ЦТС-19; 3D печать; аддитивные технологии; композитные материалы; диэлектрическая спектроскопия.

A.V. Yudin, Yu.I. Yurasov, O.A. Belyak, P.S. Plyaka, M.I. Tolstunov

TECHNOLOGICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES OF RESINS FOR DLP 3D PRINTING WITH ADDITIVES OF Al_2O_3 AND CTS-19 POWDERS

Expanding the range of materials available for processing by additive methods is of great interest to industry. Technologies such as 3D polymer printing significantly expand the boundaries of design capabilities, allowing a transition to next-generation devices. In view of the gradual implementation of such approaches in practice, a new impetus for development has been given to the direction of metamaterials - volumetric structures whose geometry allows for more complete use of the properties of the base material. In particular, ceramics, common in modern electronics, can be introduced into a polymer molded by an additive method as a functional additive. Subsequent heat treatment of such compositions allows obtaining

a macrostructured ceramic-polymer or purely ceramic framework with unique piezo- or dielectric properties. However, additive particles can significantly change the technological properties of the base material, which must be taken into account. At the same time, isolating the empirical features characterizing this dynamics is a non-trivial task. Thus, in publications on UV-curable composites, the viscosity criterion of the composition is recognized as the leading feature. At the same time, optical permittivity, which determines the required equipment power, is not considered properly. In this regard, the presented work studies the viscosity, dielectric, optical and temperature properties of composites based on UV-curable resin for DLP 3D printing, containing additives of 5 vol. % Al₂O₃ and CTS-19 powders. A method for qualitative express analysis of the technological suitability of the composition based on the Scotch test is presented. It is shown that the viscosity of the composition is less significant in comparison with its optical permittivity in the UV range. The considered compositions have temperature stability up to 300 °C. The introduction of powder additives makes it possible to increase the dielectric permittivity ϵ'/ϵ_0 by 2.5 times and reduce dielectric losses in the material when heated above 110 °C. It is shown that composites containing aluminum oxide have potential for use in electronics.

Aluminum oxide Al₂O₃; CTS-19; 3D printing; additive technologies; composite materials; dielectric spectroscopy.

1. Введение. Аддитивные технологии продолжают активно внедряться в различных отраслях тяжелой промышленности и постоянно находят новые способы применения [1–5]. Среди них 3D печать полимерами [6] отличается наибольшей доступностью и простотой реализации. Расширение спектра материалов, доступных для обработки данным способом, является одним из ключевых факторов для дальнейшего развития направления [7].

Наиболее распространенными типами 3D принтеров на сегодняшний день являются сборки, работающие по FDM [8, 9] и DLP [9] технологиям. DLP метод представляет собой процесс, основанный на послойном отверждении УФ-чувствительных жидких смол. В сравнении с FDM подходом, его преимуществами являются высокая точность формируемой геометрии и хорошая производительность. Это определяет высокую конкурентную способность УФ 3D печати в ряде областей, примерами которых могут служить медицина [10] и электроника [2].

Концепция керамик на полимерной основе (Polymer Derived Ceramics) – одно из перспективных направлений, интерес к которому заново возник благодаря развитию оборудования для 3D печати [11]. Она предполагает создание керамонаполненного материала, обрабатываемого по отлаженным маршрутам аддитивного формования, с последующим высокотемпературным синтезом основной фазы. Это позволит создавать объемные каркасные структуры сложных форм, известные также метаматериалы [12]. Они представляют особый интерес для полупроводниковой микроэлектроники и радиотехники [13, 14], где могут быть эффективно использованы для создания печатных плат и компонентной базы нового поколения.

Для практического применения особый интерес представляют УФ-отверждаемые составы, содержащие оксиды кремния [17], циркония [18] и алюминия [19], а также пьезоэлектрики, яркими представителями которых являются системы ЦТС [20] и титанат бария [21, 22]. При этом предельно допустимые концентрации данных добавок существенно различаются. Так, в [20] для системы ЦТС, смешиваемой с разными типами УФ-отверждаемых смол, максимальная доля твердой фракции не превышала 10 об. %. В то же время, в [21, 22] сообщается об успешном производстве образцов, содержащих 30 об. % титаната бария. Также, в [23] доля добавки оксида алюминия была успешно доведена до 55 об. %.

Дальнейшее насыщение полимера порошками приводит к значительному усугублению проблемы межслойной адгезии, которая характерна для DLP 3D печати в целом [15, 16]. Возникающее при этом расслоение зачастую трудно диагностировать непосредственно в ходе работы оборудования. Данное явление может быть устранено с помощью оптимизации состава и режимов его отверждения, что требует экономичной и эффективной методики анализа. Для этого может быть адаптирована качественная оценка методом скотч-теста, которая широко используется в исследованиях адгезии металлических покрытий, наносимых на полимерные детали [24].

В качестве важной характеристики, влияющей на результативность формования керамонаполненных композиций, ряд исследователей выделяют вязкость жидких составов [21–23], которая значительно возрастает при увеличении доли твердой фракции. Однако, из результатов работы [20] следует, что оптическая проницаемость добавляемой керамики в ультрафиолетовом диапазоне является не менее важным фактором. В работах [25–27] представлены данные по пропусканию света тонкими пленками из ЦТС, оксида алюминия и титаната бария соответственно. Из них следует, что на длинах волн порядка 400 нм поглощающая способность в первом случае гораздо выше, чем в остальных. Таким образом, прослеживается корреляция между УФ-проницаемостью керамики и ее применимостью в качестве добавки для 3D печати по DLP технологии. С другой стороны, дисперсность порошковой добавки также может оказывать значительное влияние на характеристики отверждения. Подобные утверждения требуют натурной верификации, что позволит однозначно установить степень взаимного влияния параметров. Кроме того, известно, что даже малые концентрации функциональной добавки способны значительно изменять итоговые характеристики материала. В этой связи оценка электрофизических свойств получаемых композитов на разных этапах их обработки представляет практический интерес.

В рамках данной работы экспериментально получены УФ-отверждаемые составы, содержащие одинаковое эффективное количество порошков системы ЦТС-19 и оксида алюминия Al_2O_3 , которые не препятствуют их эффективному формованию методами DLP 3D печати. Представлено сравнение их диэлектрических, температурных, оптических и вязкостных свойств. Полученные результаты показывают перспективность керамонаполненных составов, содержащих Al_2O_3 , которые могут быть использованы для производства пассивных электронных компонентов.

2. Материалы и методы. Объектами исследования являлись образцы как в жидком, так и в отвержденном агрегатных состояниях. Исходные составы были получены путем механического диспергирования установленной объемной доли порошковой добавки в коммерчески доступных смолах для 3D печати. Их отверждение выполнялось с использованием специализированного устройства, которое позволяло получать равномерные слои материала с толщиной 150 мкм. Оценивались показатели вязкости для жидких композиций, а также свойства оптического пропускания и диэлектрической проницаемости полученных из них пленок.

2.1. Исходные материалы. В качестве основы для керамонаполненных составов исследованы 3 типа базового материала, названия и основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные свойства использованных фотополимеров

Параметр	Anycubic High Clear Resin	HARZ Labs Model Resin	Fun To Do Industrial Blend
Цвет	Прозрачный	Зеленый	Черный
Спектр засветки, нм	365 - 405	365 - 405	225 - 415 нм
Твердость, Шор	78	87 - 92	75
Вязкость, мПа·с	266	800-1000	95
Удлинение при разрыве, %	14.6	4 - 6%	-
Плотность, г/см ³	1.05 - 1.25	1,1	1.05
Прочность на растяжение, МПа	28.1	-	-
Усадка, %	3.72 - 4.24	<0.5%	<0.5%

В смолу в количестве от 5, 7,5 и 10 об. % вводились порошковые добавки оксида алюминия Al_2O_3 и цирконата титаната свинца ЦТС-19. Диспергирование и гомогенизация состава осуществлялись на протяжении 120 мин в закрытой непрозрачной емкости путем, помещенной на магнитной мешалке, частота вращения якоря которой составляла 60 об/мин.

2.2. Получение пленочных образцов. Для достоверного воспроизведения условий DLP 3D печати в малых объемах разработан метод послойного отверждения пленочных образцов керамонаполненных полимерных композиций, где используется специально спроектированное устройство, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

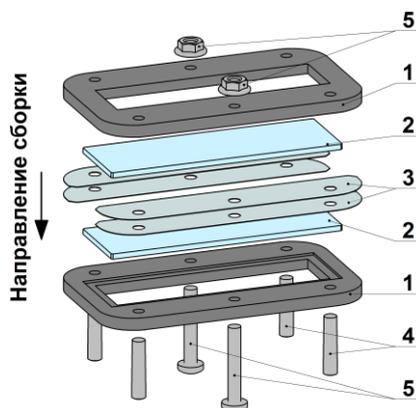


Рис. 1. Принципиальная схема приспособления для получения пленочных образцов УФ-отверждаемых полимерных композиций

Сборка состоит из двух жестких оптически непрозрачных планок (1), в которых размещаются стандартные предметные стекла (2). На нижнее из них вручную наносится образец УФ-отверждаемого состава с добавками. Толщина формируемой пластинки регулируется вкладышами из ФЭП пленки (3) с шагом 0,15 мм. Последние позиционируются в приспособлении с помощью направляющих штифтов (4) и поверхностей предметных стекол. Перед воздействием УФ-излучением конструкция стягивается с помощью болтовых соединений (5), что обеспечивает растекание состава по поверхностям рабочей зоны и равномерность толщины формируемых образцов. Односторонняя засветка осуществляется через окошко в верхней планке с помощью шести УФ-диодов с длиной волны 405 нм и общей мощностью 6 Вт. В этом случае нижний паз закрывается оптически непрозрачной вставкой. При необходимости в такой конструкции возможно проводить двустороннюю засветку с помощью распределенной системы излучателей. После воздействия ультрафиолетом болтовые соединения снимаются, предметные стекла свободно извлекаются из планок, а полученные пленки удаляются с их поверхности при помощи острого лезвия.

Ввиду большой толщины слоя, которая в среднем составляет 0,15 мм, время односторонней засветки УФ-излучением было значительно больше интервала, используемого в коммерческих принтерах, и составляло 75 сек/слой. Перед дальнейшим использованием полученные пленочные образцы промывались в изопропиловом спирте для удаления механических загрязнителей и неотвержденных остатков смолы.

2.3. Качественная оценка методом скотч-теста. Для качественной оценки межслойной адгезии с применением скотч-теста были изготовлены двухслойные образцы. Для этого использован второй комплект вкладышей из ФЭП пленки, устанавливаемый дополнительно при повторном нанесении жидкого состава. Для гарантированной оценки именно свойств межслойной адгезии применение поверхностных разделителей в ходе работ исключалось.

Из полученных двухслойных пластинок с помощью импульсного твердотельного лазера с длиной волны 1060~1085 нм и мощностью 30 Вт были вырезаны круглые образцы диаметром 13 мм, на боковые поверхности которых с двух сторон наносилась обычная полипропиленовая клейкая лента толщиной 30 мкм. Затем она рывком удалялась с поверхности. Тест считался успешно пройденным в случае, если разделения образца не произошло, и одна из клейких лент осталась полностью чистой. Дальнейшие исследования проводились для составов, успешно прошедших качественную оценку свойств.

2.4. Количественные методы исследования. Микроструктура порошков Al_2O_3 и ЦТС-19 исследовалась с помощью оптического 3D-сканирующего лазерного микроскопа Keyence VK-9700 ($\lambda = 408$ нм, Япония) в ЦКП ЮНЦ РАН. В ходе проведения анализа образец сначала насыпали на предметное стекло, после чего стряхивали. Для исследования оставшегося на стекле материала были выбраны участки с наиболее однородно распределенными по поверхности частицами. Измерения линейных размеров производилось при помощи специализированного программного обеспечения VK Analyzer.

Измерения кинематической вязкости жидких композиций выполнялись согласно ГОСТ 33-2016 с применением капиллярного вискозиметра ВПЖ-4, константа которого составляла $C = 0,8138$ мм²/с². Для каждого состава проведено по три последовательных эксперимента при постоянной температуре 25⁰С. Плотность оценивалась расчетным способом исходя из допущений, что для основной смолы и добавок Al_2O_3 и ЦТС-19 этот параметр равен 1,15 г/см³, 3,4 г/см³ и 7,6 г/см³ соответственно.

Для проверки правильности соотношения объемных долей фракций в образцах был проведен термогравиметрический анализ отвержденных образцов.

Измерения оптического пропускания и диэлектрической проницаемости осуществлялись для отвержденных однослойных пленок толщиной 150 мкм. В первом случае использован спектрофлуориметр Флюорат-02, заготовки для которого были обрезаны до прямоугольников с длиной 30 мм и шириной 12,5 мм. Они вставлялись в квадратную измерительную кювету по диагонали, где полностью перекрывали измерительную область.

Для оценки диэлектрических свойств на поверхности образцов, предварительно обработанных изопропиловым спиртом, с применением шаблона диаметром 6 мм наносился слой токопроводящего серебряного покрытия из клея Контактол. Чтобы предотвратить отделение основной части, перед удалением шаблона границы электродов дополнительно были намечены лазером. Исследование относительной диэлектрической проницаемости (ϵ'/ϵ_0) и тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) проводилось измерительном комплексе с использованием RLC-метра Е7-20 [27]. Запись получаемых данных и расчет параметров осуществлялись автоматически с помощью специально разработанного программного обеспечения [28]. Измерения проводились в диапазоне частот (f) 25 Гц...1 МГц при температурах 25...160⁰С в режимах монотонного нагрева и охлаждения со скоростью 1 ⁰С/мин (методика № GSSD ME 184-2011 [29]).

3. Результаты и обсуждение. 3.1. Микроскопия порошков. С помощью цифровой микроскопии на выборке, сформированной из 5 областей, были определены минимальный, средний и максимальный размеры частиц использованных в исследовании порошков. Полученные результаты представлены табл. 2. Микрофотографии образцов показаны рис. 2.

Таблица 2

Размеры частиц порошков Al_2O_3 и ЦТС-19

Размер частиц, мкм	Al_2O_3	ЦТС-19
Максимальный	11,258	2,739
Минимальный	1,365	0,26
Средний	3,8614	0,9428

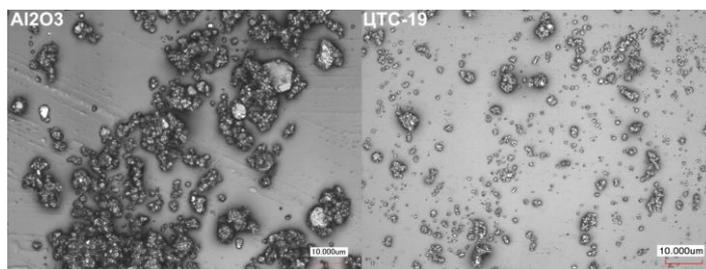


Рис. 2. Микрофотографии использованных порошков

3.2. Качественная оценка методом скотч-теста. В то время, как все рассмотренные составы с Al_2O_3 успешно прошли процедуру качественной оценки, аналогичные результаты для композиций, содержащих ЦТС-19, показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты качественной оценки составов с добавками ЦТС-19

Фотополимер	Доля добавки, об. %	Получен однослойный образец	Получен двухслойный образец	Пройден скотч-тест
HARZ Labs Model Resin (MR)	10	-	-	-
	7,5	+	-	-
	5	+	+	-
Fun To Do Industrial Blend (IB)	10	-	-	-
	7,5	+	-	-
	5	+	+	+
Anycubic High Clear Resin (HCR)	10	-	-	-
	7,5	+	+	-
	5	+	+	+

Из представленных данных видно, что составы, основанные на прозрачной УФ-отверждаемой смоле, демонстрируют наиболее высокие качественные показатели. В этой связи для дальнейшего рассмотрения отобраны композиции, состоящие из фотополимера HCR и 5 об. % твердой фракции ЦТС-19 и Al_2O_3 . Более высокие объемные концентрации из исследования исключаются ввиду невозможности количественного сопоставления результатов для разных видов добавок.

Полученный результат потенциально может быть использован в качестве критерия оценки пригодности керамонаполненного состава для 3D печати DLP методом из-за значительного сходства условий скотч-теста и реального технологического процесса.

3.3. Вязкость составов. Результаты измерения вязкости приведены в табл. 3. Из представленных данных следует, что вязкость чистого состава практически в два раза больше заявленной производителем. Это может быть объяснено началом процесса полимеризации при первичном вскрытии тары, что привело к контакту связующего с воздухом и искусственным освещением.

Таблица 3

Показатели вязкости неотвержденных керамонаполненных составов на основе УФ-отверждаемой смолы HCR

Образец	Время истечения t, с	Расчетная плотность состава ρ , г/см ³	Вязкость кинематическая ν , мм ² /с	Вязкость динамическая η , мПа·с
Без добавок	582	1,150	469	545
5 об. % Al_2O_3	650	1,263	529	668
5 об. % ЦТС-19	590	1,473	480	707

Также видно, что введение в фотополимер добавок увеличивает его показатель вязкости. При этом значение ν несколько больше для добавки 5 об. % Al_2O_3 , в то время как показатель η выше для составов, содержащих ЦТС-19. Необходимо отметить, что изменение этих свойств в полученном диапазоне не оказывают существенного влияния на технологичность композиции. Составы остаются достаточно жидкими и текучими для эффективного формования методами DLP 3D печати.

3.4. Термогравиметрия составов. Данные термогравиметрии представлены на рис. 3. Из них следует, что при сгорании чистого полимера остаточная масса составляет порядка 1 масс. % от исходной. С учетом этой погрешности может быть сделан вывод, что

реальная массовая доля твердой фракции в отвержденных пленках соответствует номинальным значениям, которые для 5 об. % добавки равны 13,46 и 26 масс. % для Al_2O_3 и ЦТС-19 соответственно.

Кроме того, на графике видно, что в диапазоне температур вплоть до 300 °С материалы остаются достаточно стабильными, что определяет возможность их практического применения в аналогичных условиях.

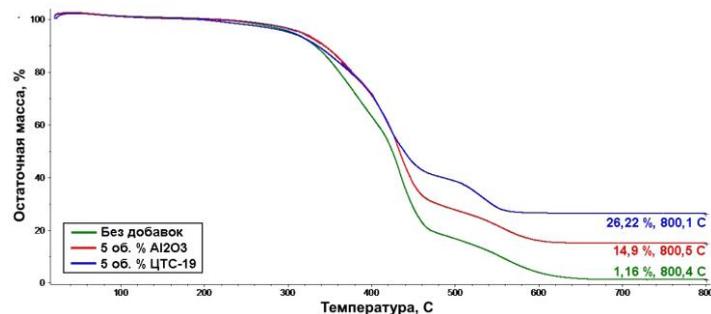


Рис. 3. Термогравиметрические кривые УФ-отвержденных керамонаполненных составов на основе HCR

3.5. Оптическое пропускание. Полученные спектры пропускания отвержденных пленок толщиной 150 мкм приведены на рис. 4.

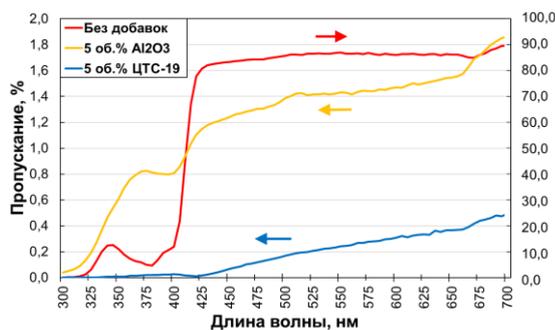


Рис. 4. Оптическое пропускание УФ-отвержденных керамонаполненных составов на основе HCR

Из представленных данных видно, что даже у чистой смолы присутствует достаточно большое поглощение спектра вблизи 405 нм, что, по-видимому, необходимо для запуска процессов полимеризации. Однако, введение в состав керамических добавок дополнительно снижает его пропускающую способность. Так, для добавок Al_2O_3 и ЦТС-19 проникаемость в требуемом УФ-диапазоне составляет порядка 0,86% и 0,09%, соответственно.

Это может быть обусловлено как меньшим размером частиц во втором случае, так и наличием корреляции с поглощающей способностью материала добавки. При этом увеличение среднего размера частиц ЦТС приведет к их более интенсивному оседанию, что может значительно снизить пригодность для печати. Таким образом, применение систем ЦТС в качестве добавки в УФ-отверждаемые полимеры в значительных объемах не представляется возможным, что дополнительно подтверждается данными работы [20].

3.6. Диэлектрические свойства. На рис. 5 представлены диэлектрические спектры зависимостей $\epsilon'/\epsilon_0(f)$, $tg\delta(f)$ для чистой смолы (а) и композита с добавкой 5 об. % Al_2O_3 (б).

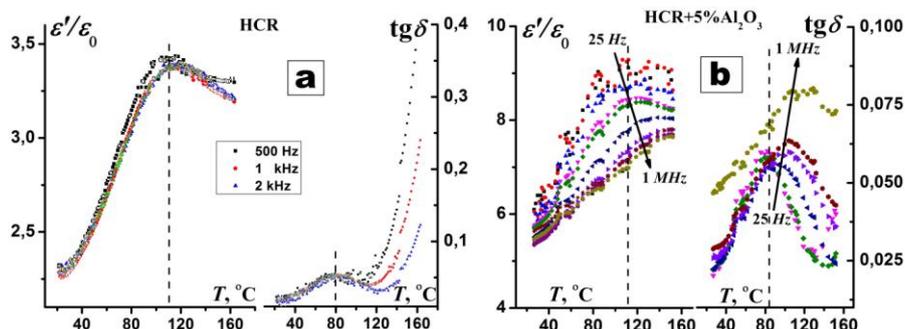


Рис. 5. Диэлектрические спектры зависимостей $\epsilon'/\epsilon_0(f)$, $\text{tg}\delta(f)$ УФ-отвержденной смолы HCR (a) и композита с 5 об. % Al_2O_3 (b)

Как видно из графика $\epsilon'/\epsilon_0(f)$, при температуре 110 °C наблюдается явление, схожее с релаксационным фазовым переходом (ФП) второго рода. Эта перестройка внутренней структуры объекта также подтверждается изменением зависимости $\text{tg}\delta(f)$, где также следует отметить резкий рост диэлектрических потерь при дальнейшем нагреве [30].

Введение в полимер 5 об. % Al_2O_3 приводит к росту ϵ'/ϵ_0 в 2,5 раза ($\epsilon'/\epsilon_0=6$), а также к снижению диэлектрических потерь при нагреве выше 110 °C. Полученные результаты позволяют предположить, что такой материал потенциально применимым в электронике для создания пассивных компонентов. Кроме того, представляется возможным дальнейшее увеличение доли керамической фракции.

Диэлектрические спектры зависимостей $\epsilon'/\epsilon_0(f)$, композита, содержащего 5% ЦТС-19 представлены на рис. 6.

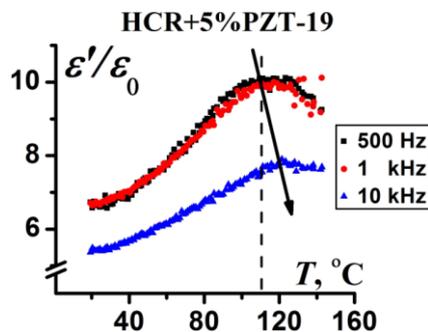


Рис. 6. Спектр диэлектрической проницаемости $\epsilon'/\epsilon_0(f)$ УФ-отвержденного композита с 5 об. % ЦТС-19

Из приведенных данных следует, что структурный отклик материала во многом аналогичен композиту, содержащему оксид алюминия. Несколько большие значения проницаемости могут быть отнесены на счет свойств материала добавки. В это же время, общая динамика скорее обусловлена введением в смолу керамического порошка в целом. Учитывая, что более насыщенные добавкой ЦТС-19 композиты плохо поддаются отверждению по технологии DLP 3D печати, следует признать, что подобные составы обладают значительно меньшим потенциалом в сравнении с аналогами, содержащими Al_2O_3 .

Заключение. В работе проведено исследование вязкостных, диэлектрических, оптических и температурных свойств композитов на основе УФ-отверждаемой смолы для DLP 3D печати, содержащих добавки 5 об. % порошков Al_2O_3 и ЦТС-19. Представлен метод качественного экспресс-анализа технологической пригодности состава, основанный на скотч-тесте. Показано, что вязкость состава менее значима в сравнении с его оптической проницаемостью в УФ-диапазоне. При этом на оптические свойства композита может влиять как дисперсность добавки, так и ее химический состав. Приоритезация

критериев в данном случае требует дополнительного исследования. При этом необходимо отметить, что увеличение размера частиц будет приводить к более быстрому их оседанию, что также может значительно снизить технологичность состава.

Данные термогравиметрии показывают, что рассмотренные составы обладают температурной стабильностью вплоть до 300 °С, которая определяется свойствами чистого полимера.

При исследовании диэлектрических свойств выяснено, что пленочные образцы с толщиной 150 мкм, содержащие 5 об. % добавок Al_2O_3 и системы ЦТС-19 обладают существенно отличным от исходной смолы структурным откликом. Так, введение добавок позволяет в 2,5 раза увеличить показатель диэлектрической проницаемости ϵ'/ϵ_0 и снизить диэлектрические потери в материале при его нагреве выше 110 °С. При этом содержание оксида алюминия в составе композита может быть дополнительно увеличено без потери технологичности. Это определяет перспективность УФ-отверждаемых композитов с Al_2O_3 в качестве материала для производства пассивных элементов электроники, таких как печатные платы, производство которых из чистого корунда является трудоемким и дорогостоящим.

Работа выполнена в рамках госзадания ЮНЦ РАН №122020100352-6 с использованием оборудования ЦКП ЮНЦ РАН №501994.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Byron Blakey-Milner et al.* Metal additive manufacturing in aerospace: A review // *Materials & Design*. – 2021. – 209. – 110008.
2. *Young-Geun Park et al.* High-Resolution 3D Printing for Electronics // *Advanced Science*. – 2022. – 9. – 2104623.
3. *Marcin Ziolkowski and Tomasz Dyl.* Possible Applications of Additive Manufacturing Technologies in Shipbuilding: A Review // *Machines*. – 2020. – 8. – 84.
4. *Cheng Sun et al.* Additive Manufacturing for Energy: A Review // *Applied Energy*. – 2021. – 282 A. 116041.
5. *Henry A. Colorado et al.* Additive manufacturing in armor and military applications: research, materials, processing technologies, perspectives, and challenges // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – 27. – P. 3900-3913.
6. *Iftekar S.F. et al.* Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review // *Polymers*. – 2023. – 15. – 2519.
7. *Chuhong Zhang et al.* Current advances and future perspectives of additive manufacturing for functional polymeric materials and devices // *SusMat*. – 2021. – 1. – P. 127-147.
8. *Amit M.E. Arefin et al.* Polymer 3D Printing Review: Materials, Process, and Design Strategies for Medical Applications // *Polymers*. – 2021. – 13. – 1499.
9. *Erin M. Maines et al.* Sustainable Advances in SLA/DLP 3D Printing Materials and Processes // *Green Chemistry*. – 2021. – 18.
10. *Xu X. et al.* Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications // *Journal of Controlled Release*. – 2020.
11. *Thomas Lacelle et al.* Additive manufacturing of polymer derived ceramics: Materials, methods, and applications // *APL Materials*. – 2023. – 11. – 070602.
12. *Aamer Nazir et al.* Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials // *Materials & Design*. – 2023. – 226. – 111661.
13. *Ren Z., Mujib S.B., Singh G.* High-Temperature Properties and Applications of Si-Based Polymer-Derived Ceramics: A Review // *Materials*. – 2021. – 14. – 614.
14. *Suresh Kumar N. et al.* A Review on Metamaterials for Device Applications // *Crystals*. – 2021. – 11. – 518.
15. *Mamatha S., Biswas P., Johnson R.* Digital light processing of ceramics: an overview on process, materials and challenges // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2023. – 8. – P. 1083-1102.
16. *Truxova V. et al.* Ceramic 3d printing: Comparison of SLA and DLP technologies // *MM Science Journal*. – 2020. – 2. – P. 3905-3911.
17. *Peng Cai et al.* Effects of slurry mixing methods and solid loading on 3D printed silica glass parts based on DLP stereolithography // *Ceramics International*. – 2020. – 46. 10. B. – P. 16833-16841.

18. *Komissarenko D. et al.* DLP 3D printing of scandia-stabilized zirconia ceramics // *Journal of the European Ceramic Society.* – 2021. – 41. 1. – P. 684-690.
19. *Xiaohong Xu et al.* Study of alumina ceramic parts fabricated via DLP stereolithography using powders with different sizes and morphologies // *Applied Ceramic Technology.* – 2022. – 20. 2.
20. *Ryis Mitkus et al.* Investigation and attempt to 3D print piezoelectric 0-3 composites made of photopolymer resins and PZT // *Proceedings of the ASME 2020 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems.* 2020. September 14-16. Irvine. CA. USA.
21. *Sotov A. et al.* LCD-SLA 3D printing of BaTiO₃ piezoelectric ceramics // *Ceramics International.* – 2021. – 47. – P. 30358-30366.
22. *Yushun Zeng et al.* 3D-Printing Piezoelectric Composite with Honeycomb Structure for Ultrasonic Devices // *Micromachines.* – 2020. – 11. – 713.
23. *Qiaolei Li et al.* Balancing flexural strength and porosity in DLP-3D printing Al₂O₃ cores for hollow turbine blades // *Journal of Materials Science & Technology.* – 2022. – 104. – P. 19-32.
24. *Melentiev R. et al.* Metallization of polymers and composites: State-of-the-art approaches // *Materials & Design.* – 2022. – 221. – 110958.
25. *Rodrigues S. et al.* Improvement of the fatigue and the ferroelectric properties of PZT films through a LSCO seed layer // *Materials Science and Engineering.* – 2013. – B. 178. – P. 1224-1229.
26. *Hameed M. et al.* Preparation and Characterization of Al₂O₃ Nanostructures by Pulsed-Laser Deposition // *Journal of Optoelectronics and Photonics.* – 2015. – 6. 8. – P. 43-46.
27. *Rouholah Ashiri et al.* Development and investigation of novel nanoparticle embedded solutions with enhanced optical transparency // *Journal of Materials Research.* – 2014. – 29 (24). – P. 2949-2956.
28. Патент РФ на полезную модель № 66552. Автоматический измерительный стенд электрофизических параметров сегнето-пьезоматериалов в широком интервале температур и частот / Ю.И. Юрасов. Заявка № 2007102548, приоритет от 23.01.2007. Зарег. 10.09.2007. Опубл. 10.09.2007. Бюл. Изобретения. Полезные модели № 25, 2007.
29. Расчет диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в широком интервале температур и частот (Лабораторный стенд ЮКОМП 2.0) / Ю.И. Юрасов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. №2006611142. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.03.2006 г.
30. Методика экспериментального определения комплексной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, температуры Кюри диэлектрических материалов в широком диапазоне температур (10÷1000) К, частот (10⁻³÷1·10⁶) Гц электрического измерительного поля / Резниченко Л.А., Андриюшин К.П., Андриюшина И.Н., Вербенко И.А., Кубрин С.П., Павелко А.А., Павленко А.В., Юрасов Ю.И. // Аттестат № 184 от 03.05. 2011. Методика № ГСССД МЭ 184-2011 ФГУП «Стандартинформ» ГНМЦ «ССД».
31. *Yurasov Y.I. and Nazarenko A.V.* Parameter of dielectric loss distribution in the new model for complex conductivity based on Havriliak–Negami formula // *J. of Advanced Dielectrics.* – 2020. – 10 (1,2). – 2060006.

REFERENCES

1. *Byron Blakey-Milner et al.* Metal additive manufacturing in aerospace: A review, *Materials & Design*, 2021, 209, 110008.
2. *Young-Geun Park et al.* High-Resolution 3D Printing for Electronics, *Advanced Science*, 2022, 9, 2104623.
3. *Marcin Ziolkowski and Tomasz Dyl.* Possible Applications of Additive Manufacturing Technologies in Shipbuilding: A Review, *Machines*, 2020, 8, 84.
4. *Cheng Sun et al.* Additive Manufacturing for Energy: A Review, *Applied Energy*, 2021, 282 A, 116041.
5. *Henry A. Colorado et al.* Additive manufacturing in armor and military applications: research, materials, processing technologies, perspectives, and challenges, *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27, pp. 3900-3913.
6. *Iftekar S.F. et al.* Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review, *Polymers*, 2023, 15, 2519.
7. *Chuhong Zhang et al.* Current advances and future perspectives of additive manufacturing for functional polymeric materials and devices, *SusMat*, 2021, 1, pp. 127-147.
8. *Amit M.E. Arefin et al.* Polymer 3D Printing Review: Materials, Process, and Design Strategies for Medical Applications, *Polymers*, 2021, 13, 1499.
9. *Erin M. Maines et al.* Sustainable Advances in SLA/DLP 3D Printing Materials and Processes, *Green Chemistry*, 2021, 18.

10. Xu X. et al. Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications, *Journal of Controlled Release*, 2020.
11. Thomas Lacelle et al. Additive manufacturing of polymer derived ceramics: Materials, methods, and applications, *APL Materials*, 2023, 11, 070602.
12. Amer Nazir et al. Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials, *Materials & Design*, 2023, 226, 111661.
13. Ren Z., Mujib S.B., Singh G. High-Temperature Properties and Applications of Si-Based Polymer-Derived Ceramics: A Review, *Materials*, 2021, 14, 614.
14. Suresh Kumar N. et al. A Review on Metamaterials for Device Applications, *Crystals*, 2021, 11, 518.
15. Mamatha S., Biswas P., Johnson R. Digital light processing of ceramics: an overview on process, materials and challenges, *Progress in Additive Manufacturing*, 2023, 8, pp. 1083-1102.
16. Truxova V. et al. Ceramic 3d printing: Comparison of SLA and DLP technologies, *MM Science Journal*, 2020, 2, pp. 3905-3911.
17. Peng Cai et al. Effects of slurry mixing methods and solid loading on 3D printed silica glass parts based on DLP stereolithography, *Ceramics International*, 2020, 46. 10. B, pp. 16833-16841.
18. Komissarenko D. et al. DLP 3D printing of scandia-stabilized zirconia ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41. 1, pp. 684-690.
19. Xiaohong Xu et al. Study of alumina ceramic parts fabricated via DLP stereolithography using powders with different sizes and morphologies, *Applied Ceramic Technology*, 2022, 20. 2.
20. Rytis Mitkus et al. Investigation and attempt to 3D print piezoelectric 0-3 composites made of photopolymer resins and PZT, *Proceedings of the ASME 2020 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. 2020. September 14-16. Irvine. CA. USA.
21. Sotov A. et al. LCD-SLA 3D printing of BaTiO₃ piezoelectric ceramics, *Ceramics International*, 2021, 47, pp. 30358-30366.
22. Yushun Zeng et al. 3D-Printing Piezoelectric Composite with Honeycomb Structure for Ultrasonic Devices, *Micromachines*, 2020, 11, 713.
23. Qiaolei Li et al. Balancing flexural strength and porosity in DLP-3D printing Al₂O₃ cores for hollow turbine blades, *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 104, pp. 19-32.
24. Melentiev R. et al. Metallization of polymers and composites: State-of-the-art approaches, *Materials & Design*, 2022, 221, 110958.
25. Rodrigues S. et al. Improvement of the fatigue and the ferroelectric properties of PZT films through a LSCO seed layer, *Materials Science and Engineering*, 2013, B. 178, pp. 1224-1229.
26. Hameed M. et al. Preparation and Characterization of Al₂O₃ Nanostructures by Pulsed-Laser Deposition, *Journal of Optoelectronics and Photonics*, 2015, 6. 8, pp. 43-46.
27. Rouholah Ashiri et al. Development and investigation of novel nanoparticle embedded solutions with enhanced optical transparency, *Journal of Materials Research*, 2014, 29 (24), pp. 2949-2956.
28. Yurasov Yu.I. Patent RF na poleznuyu model' № 66552. Avtomaticheskiiy izmeritel'nyy stand elektrofizicheskikh parametrov segneto-p'ezomaterialov v shirokom intervale temperatur i chastot [Russian Federation Patent for Utility Model No. 66552. Automatic Measuring Stand for Electroelectric-Piezoelectric Materials in a Wide Range of Temperatures and Frequencies]. Application No. 2007102548, priority from 23.01.2007. Reg. 10.09.2007. Published 10.09.2007. Bulletin of Inventions. Utility Models No. 25, 2007.
29. Yurasov Yu.I. Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM. №2006611142. Raschet dielektricheskoy pronitsaemosti i tangensa ugla dielektricheskikh poter' v shirokom intervale temperatur i chastot (Laboratornyy stand YuKOMP 2.0) [Certificate of official registration of the computer program. No. 2006611142. Calculation of permittivity and tangent of dielectric loss angle in a wide range of temperatures and frequencies (Laboratory stand YuKOMP 2.0)]. Registered in the Register of computer programs on March 29, 2006.
30. Reznichenko L.A., Andryushin K.P., Andryushina I.N., Verbenko I.A., Kubrin S.P., Pavelko A.A., Pavlenko A.V., Yurasov Yu.I. Attestat № 184 ot 03.05. 2011. Metodika № GSSSD ME 184-2011 FGUP «Standartinform» GNMTS «SSD». Metodika eksperimental'nogo opredeleniya kompleksnoy dielektricheskoy pronitsaemosti, tangensa ugla dielektricheskikh poter', temperatury Kyuri dielektricheskikh materialov v shirokom diapazone temperatur (10÷1000) K, chastot (10-3÷1·106) Gts elektricheskogo izmeritel'nogo polya [Certificate No. 184 dated 03.05. 2011. Methodology No. GSSSD ME 184-2011 FSUE "Standartinform" GNMC "SSD". Methodology for experimental determination of complex permittivity, dielectric loss tangent, Curie temperature of dielectric materials in a wide range of temperatures (10÷1000) K, frequencies (10-3÷1·106) Hz of the electric measuring field].
31. Yurasov Y.I. and Nazarenko A.V. Parameter of dielectric loss distribution in the new model for complex conductivity based on Havriliak–Negami formula, *J. of Advanced Dielectrics*, 2020, 10 (1,2), 2060006.

Юдин Андрей Викторович – Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: andryudin1997@gmail.com; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 89287580948; м.н.с.

Юрасов Юрий Игоревич – e-mail: yucomp@yandex.ru; тел.: 88632509810 (315); д.т.н.; в.н.с.

Пляка Павел Стефанович – e-mail: pavstef@mail.ru; тел.: 88632509810 (118); к.ф.-м.н.; в.н.с.

Толстунов Михаил Игоревич – e-mail: miftol@ya.ru; тел.: 89518413238; к.х.н.; с.н.с.

Беляк Ольга Александровна – Ростовский государственный университет путей сообщения; Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: belyak.o.a@gmail.com; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 88632726449; д.ф.-м.н.; проф.

Yudin Andrey Victorovich – Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences; e-mail: andryudin1997@gmail.com; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79287580948; junior researcher

Yurasov Yuriy Igorevich – e-mail: yucomp@yandex.ru; phone: 88632509810 (315); dr. of eng. sc.; leading researcher.

Plyaka Pavel Stefanovich – e-mail: pavstef@mail.ru; phone: +78632509810 (118); cand. of phys. and math. sc.; leading researcher.

Tolstunov Michail Igorevich – e-mail: miftol@ya.ru; phone: +79518413238; cand. of chem. sc.; senior researcher.

Belyak Olga Aleksandrovna – Rostov State Transport University; Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences; e-mail: belyak.o.a@gmail.com; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632726449; dr. of phys. and math. sc.; 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/>.