

16+

ISSN 2074-1707

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Н. ТАТИЩЕВА

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2022

№ 2 (58)

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК России для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям.

Группа специальностей 1.2 «Компьютерные науки и информатика»:

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Группа специальностей 2.2 «Электроника, фотоника, приборостроение и связь»:

2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки);

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки);

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки).

Группа специальностей 2.3 «Информационные технологии и телекоммуникации»:

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);

2.3.4 – Управление в организационных системах (технические науки);

2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);

2.3.6 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

Журнал входит в базу данных Ulrich's Periodicals Directory.

Астрахань

Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева

2022

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Астраханского государственного университета имени В.Н. Татищева

**ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:
управление и высокие технологии**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2022
№ 2 (58)**

Редакционная коллегия

И.М. Азмухамедов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» Астраханского государственного университета имени В.Н. Татищева (главный редактор)

И.В. Аникин, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы информационной безопасности» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ

А.А. Большаков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и управления» Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)

Ж.И. Батырканов, доктор технических наук, профессор, профессор Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (Кыргызская Республика, г. Бишкек)

С.Н. Гончаренко, доктор технических наук, профессор, профессор Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (г. Москва)

Л.А. Демидова, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительной и прикладной математики» Рязанского государственного радиотехнического университета (г. Рязань)

И.Ю. Квятковская, доктор технических наук, профессор, директор Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

А.Г. Кравец, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» Волгоградского государственного технического университета

В.Ю. Кузнецова, ассистент кафедры информационной безопасности Астраханского государственного университета имени В.Н. Татищева (ответственный секретарь)

Ю.В. Литовка, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета

А.М. Лихтер, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая физика» Астраханского государственного университета имени В.Н. Татищева

А.А. Лобатый, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск)

В.В. Морозов, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (г. Владимир)

Е.В. Никульчев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и моделирование систем» Московского технологического университета (МИРЭА) (г. Москва)

В.О. Осипян, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные технологии» Кубанского государственного университета (г. Краснодар)

И.Ю. Петрова, доктор технических наук, профессор, первый проректор Астраханского государственного архитектурно-строительного университета, заведующая кафедрой САПР Астраханского государственного архитектурно-строительного университета

А.В. Рыбаков, кандидат физико-математических наук, директор «Физико-математического института» Астраханского государственного университета; доцент кафедры электротехники, электроники и автоматики Астраханского государственного университета имени В.Н. Татищева

А.В. Скрипаль, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Медицинская физика» Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

И.Б. Старченко, доктор технических наук, профессор, ООО «Параметрика», научный руководитель (г. Таганрог Ростовской области)

Ю.Ю. Тарасевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор Астраханского государственного университета имени В.Н. Татищева, заведующий лабораторией «Математическое моделирование и информационные технологии в науке и образовании»

Т.Л. Тен, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» Карагандинского экономического университета (Республика Казастан, г. Караганда)

Е.Н. Тищенко, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и защита информации» Ростовского государственного экономического университета (РИНХ) – г. Ростов-на-Дону

М.А. Ураксеев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника» Уфимского государственного авиационного технического университета

С.А. Фишт, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Биомедицинская инженерия» Юго-Западного государственного университета (г. Курск)

Л.Р. Фионова, доктор технических наук, профессор, декан факультета вычислительной техники, заведующая кафедрой «Информационное обеспечение управления и производства» Пензенского государственного университета

В.А. Цимбал, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» (Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого МО в г. Серпухов Московской области)

Н.К. Юрков, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета

N.A. Kolesova, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

Serg Miranda, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science, University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS dept. and MBDS innovation lab (www.mbd-fr.org)

Журнал выходит 4 раза в год
Все материалы, поступающие в редколлегию журнала,
проходят независимое рецензирование

© Астраханский государственный университет,
имени В.Н. Татищева, 2022
© Гайфитдинова С. Ю., дизайн обложки, 2022

ASTRAKHAN STATE UNIVERSITY
NAMED AFTER V.N. TATISHCHEV

PRIKASPIYSKIY ZHURNAL:
Upravlenie i Vysokie Tekhnologii

CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

2022
No. 2 (58)

The journal is included in the list of the reviewed scientific journals recommended by VAK of Russia for the publication of the main scientific results of theses for the candidate of science degree, for the doctor of science degree on the following scientific specialties.

Group of specialties 1.2 “Computer science and informatics”:

1.2.2 – Mathematical modelling, numerical methods and complexes of programmes (technical sciences).

Group of specialties 2.2 “Electronics, photonics, instrument engineering and communication”:

2.2.4 – Instruments and methods of measurement (by types of measurement) (technical sciences);

2.2.11 – Information-measuring and control systems (technical sciences);

2.2.12 – Medical devices, systems and products (technical sciences).

Group of specialties 2.3 “Information technologies and telecommunications”:

2.3.1 – System analysis, information control and processing (technical sciences);

2.3.4 – Management in organizational systems (technical sciences);

2.3.5 – Mathematical software and software for computing systems, complexes and computer networks (technical sciences);

2.3.6 – Information security methods and systems, information security (technical sciences).

The journal is included into the database Ulrich’s Periodicals Directory.

Astrakhan
Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev
2022

Recommended by the Editorial and Publishing Board
of Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev

**CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

2022

No. 2 (58)

Editorial Board

I.M. Azhmukhamedov, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Security Department, Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev (Editor-in-Chief)

I.V. Anikin, Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Information Security System Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI»

A.A. Bolshakov, Doct. Sci. (Engineering), Professor of «Systems of Automated Design Engineering and Control» department, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)

Zh.I. Batyrkanov, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov (Kyrgyz Republic, Bishkek)

S.N. Goncharenko, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the National University of Science and Technology «MISIS» (Moscow)

L.A. Demidova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Computational and Applied Mathematics Department, Ryazan State Radio Engineering University (Ryazan)

I.Yu. Kvyatkovskaya, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of “Information Technologies and Communications” Institute of the Astrakhan State Technical University

A.G. Kravets, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Automated Design Engineering Systems and Search Constructing Department, Volgograd State Technical University

V.Yu. Kuznetsova, assistant of Information Security Department, Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev (Executive Editor)

Yu.V. Litovka, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Automated Support System for Decision-Making, Tambov State Technical University

A.M. Likhter, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of General Physics, Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev

A.A. Lobaty, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Systems and Technologies Department, Belarusian National Technical University (Belarus, Minsk)

V.V. Morozov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (Vladimir)

E.V. Nikulchev, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the System Management and Modeling Department, Moscow Technological University (Moscow)

V.O. Osipyan, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Kuban State University (Krasnodar)

I.Yu. Petrova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, First Vice-Rector of the Astrakhan State Architectural and Construction University, Head of the CAD department of Astrakhan State Architectural and Construction University

A.V. Rybakov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Institute of Physics and Mathematics, Astrakhan State University

A.V. Skripal, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Medical Physics Department of the Saratov national research State University named after N.G. Chernyshevsky

I.B. Starchenko, Doct. Sci. (Engineering), Professor, OOO «Parametrica» (Taganrog, Rostov Oblast), Research Supervisor

Yu.Yu. Tarasevich, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev, head of the laboratory «Mathematical modeling and information technologies in science and education»

T.L. Ten, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Karaganda Economic University (Republic of Kazakhstan, Karaganda)

E.N. Tishchenko, Doct. Sci. (Economics), Professor, Head of the Information Technologies & Information Security Department, Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don

M.A. Urakseev, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Information and Measuring Equipment department of Ufa State Aviation Technical University

S.A. Filist, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of Biomedical Engineering Department, Southwest State University (Kursk)

L.R. Fionova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Dean of the Computer Technology Faculty, Head of the Department «Information Support of Management and Production, Penza State University

V.A. Tsimbal, Doct. Sci. (Engineering), Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Professor of the Automated Control Systems Department (Branch of the Military Academy of the Russian Strategic Missile Forces named after Peter the Great of the Moscow Oblast, Serpukhov, Moscow Oblast)

N.K. Yurkov, Honored worker of science of the Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the department «Designing and production of the radio equipment», Penza State University

N.A. Kolesova, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

Serg Miranda, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science dept., University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS department and MBDS innovation lab (www.mbd.fr.org)

The journal is published four times a year
All materials that come to the Editorial Board of the journal
are subject to independent peer-review

© Astrakhan State University
named after V.N. Tatishchev, 2022
© S. Yu. Gayfitdinova, cover design, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

В. Д. Шевченко, А. Н. Марьенков, А. А. Ханова

Анализ методов компьютерного зрения для выявления запрещенной символики на изображениях в сети Интернет 9–18

Т. Н. Конаныхина, А. Ю. Конаныхин, И. А. Авилон

Алгоритм быстрого нахождения контура на основе метода следования за пикселями..... 18–26

УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Е. Ю. Кунц, П. С. Ложников

Использование компетентностной модели образовательной программы для принятия управленческих решений в образовательной организации..... 27–34

А. Г. Кравец, А. А. Астанков, Г. А. Мокрушин

Виртуальный ассистент водителя для поиска места на открытой парковке 35–44

А. А. Веснинцева, И. М. Ажмухамедов

Определение социально-коммуникативных и когнитивных навыков обучающегося с целью формирования рекомендаций по выбору индивидуальной образовательной траектории..... 45–51

Д. В. Скульский, В. Ф. Шуришев, М. И. Шиккульский

Автоматизация процессов программно-целевого планирования 52–60

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Ю. А. Смирнова, Л. И. Головацкая

Разработка алгоритма и метода трансформации записи атомно-молекулярных систем..... 61–67

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

О. В. Бородин, В. А. Егунов, В. П. Плотников

Особенности использования низкоуровневого процессорного кода с использованием WebAssembly..... 68–83

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ,

И. С. Вершинин

Ассоциативная стеганография: состояние и перспективы 84–91

В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, А. С. Павлов, И. В. Стручков

Анализ рисков нарушения информационной безопасности в роевых робототехнических системах при масштабировании численности агентов 92–109

А. М. Попов, В. В. Золотарев, Е. Ю. Кунц

Проблема управления информационной безопасностью при создании цифрового двойника дисциплины 109–118

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

И. А. Соловьева, Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка

Поиск силы тока и степени загрузки барабана для снижения
неравномерности гальванического покрытия мелких деталей..... 119–126

И. Б. Шуршев, А. Х. Зайнутдинова, В. Г. Ильичев

Повышение энергоэффективности
солнечной электростанции судна типа катамаран..... 127–140

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Е. А. Саксонов, С. Е. Симонов, М. Г. Городничев, М. С. Мосева

Анализ неисправностей синхронных двигателей
с постоянными магнитами на основе мониторинга вибрации
с использованием нейронных сетей..... 141–153

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 154

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

V. D. Shevchenko, A. N. Marienkov, A. A. Khanova

Analysis of computer vision methods for detecting prohibited symbols on images on the Internet..... 9–18

T. N. Konanykhina, A. Yu. Konanykhin, I. A. Aivilov

Algorithm for fast finding the contour based on the pixel following method 18–26

MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

E. Yu. Kunts, P. S. Lozhnikov

Using the competence model of an educational program for making managerial decisions in an educational organization 27–34

A. G. Kravets, A. A. Astankov, G. A. Mokrushin

Virtual driver's assistant for search of a place in open parking 35–44

A. A. Vesnintseva, I. M. Azhmukhamedov

Determining the socio-communication and cognitive skills of a student in order to form recommendations for the choice of an individual educational trajectory..... 45–51

D. V. Skulsky, V. F. Shurshev, M. I. Shikulsky

Automation of program-target planning processes 52–60

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM SYSTEMS

Yu. A. Smirnova, L. I. Golovatskaya

Development of an algorithm and method of record transformation of atomic and molecular systems 61–67

MATHEMATICAL SOFTWARE AND SOFTWARE FOR COMPUTING MACHINES, COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS

O. V. Borodin, V. A. Egunov, V. P. Plotnikov

Features of using low-level processor code using WebAssembly 68–83

METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION PROTECTION, INFORMATION SECURITY

I. S. Vershinin

Associative steganography: state and prospects..... 84–91

V. I., Petrenko, F. B., Tebueva, A. S. Pavlov, I. V. Struchkov

Analysis of the information security of swarm robotics in the process of scaling the number of agents..... 92–109

A. M. Popov, V. V. Zolotarev, E. Yu. Kunts

Information security management problem for creating a discipline digital twin..... 109–118

**INSTRUMENT ENGINEERING, MEASUREMENT SCIENCE,
INFORMATION AND MEASURING DEVICES AND SYSTEMS**

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

I. A. Solovjeva, D. S. Solovjev, Yu. V. Litovka

Search the current and the degree of barrel-shaped cage loading
to reduce the non-uniformity for the plating coating of small details 119–126

I. B. Shurshev, L. Kh. Zaynutdinova, V. G. Ilyichev

Improving the energy efficiency
of a catamaran-type solar power plant 127–140

INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT

E. A. Saksonov, S. E. Simonov,

M. G. Gorodnichev, M. S. Moseva

Fault analysis of synchronous motors with permanent magnets
based on vibration monitoring using neural networks 141–153

RULES FOR THE AUTHORS 154

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.54398/20741707_2022_2_9
УДК 004.001

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАПРЕЩЕННОЙ СИМВОЛИКИ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ

Статья поступила в редакцию 15.03.2022, в окончательном варианте – 30.03.2022.

Шевченко Виктор Дмитриевич, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, магистрант, ORCID: 0000-0002-5839-0609, e-mail: shevchenko1999victor@mail.ru

Марьенков Александр Николаевич, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-1378-3553, e-mail: marenkovan17@gmail.com

Ханова Анна Алексеевна, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, доктор технических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-2693-8876, e-mail: akhanova@mail.ru

Рассмотрены структурные схемы и математическое обеспечение методов компьютерного зрения: поиска объекта по шаблону, бинарной классификация при помощи свёрточной нейронной сети, детекции объектов при помощи свёрточной нейронной сети с различными архитектурными решениями. Реализация всех перечисленных методов адаптирована для обнаружения запрещенной символики на изображениях сети Интернет, в случае ее присутствия и объявления о том, что изображение является запрещенным. А также распознавание символов, по строению похожих на запрещенные, но не являющихся таковыми, и объявление о том, что изображение не является запрещенным. На основе поставленной цели и сформулированных задач были протестированы три метода компьютерного зрения: поиск объекта по шаблону, бинарная классификация при помощи свёрточной нейронной сети, детекция объектов при помощи свёрточной нейронной сети на основе модели YOLOv3. Создан тестовый набор данных, включавший в себя 40 изображений, который использовался для определения точности каждого метода. Получены результаты эффективности для каждого рассмотренного метода. На основании поставленной задачи был проведен анализ трех методов компьютерного зрения: поиск объекта по шаблону, бинарная классификация при помощи свёрточной нейронной сети, детекция объектов при помощи свёрточной нейронной сети. Лучшее из них показал метод детекции объектов при помощи свёрточной нейронной сети модели YOLOv3. Процент точности данного метода составил 95 %.

Ключевые слова: компьютерное зрение, запрещенные изображения, свёрточная нейронная сеть, бинарная классификация, поиск по шаблону, детекция объекта, YOLOv3

ANALYSIS OF COMPUTER VISION METHODS FOR DETECTING PROHIBITED SYMBOLS ON IMAGES ON THE INTERNET

The article was received by the editorial board on 15.03.2022, in the final version – 30.03.2022.

Shevchenko Viktor D., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

undergraduate student, ORCID: 0000-0002-5839-0609, e-mail: shevchenko1999victor@mail.ru

Marienkov Alexander N., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0003-1378-3553, e-mail: marenkovan17@gmail.com

Khanova Anna A., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

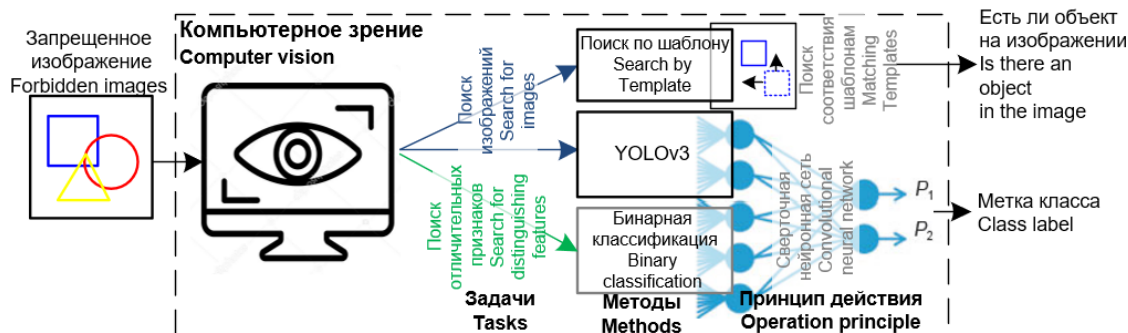
Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-2693-8876, e-mail: akhanova@mail.ru

Structural schemes and mathematical support of computer vision methods are considered: object search by template, binary classification using a convolutional neural network, object detection using a convolutional neural network with various architectural solutions. The implementation of all these methods is adapted to detect prohibited symbols on Internet images, in case of its presence and the announcement that the image is prohibited. As well as the recognition of symbols that are similar in structure to prohibited ones, but are not such, and the announcement that the image is not prohibited. Based on the set goal and formulated tasks, three computer vision methods were tested: object search by template, binary classification using a convolutional neural network, object detection using a convolutional neural network based on the YOLOv3 model. A test dataset was created that included 40 images, which was used to determine the accuracy of each method. The efficiency results for each considered method are obtained. Based on the task, three computer vision methods were analyzed: object

search by template, binary classification using a convolutional neural network, object detection using a convolutional neural network. The method of object detection using the convolutional neural network of the YOLOv3 model proved to be the best. The percentage of accuracy of this method was 95%.

Keywords: computer vision, forbidden images, convolutional neural network, binary classification, pattern search, object detection, YOLOv3

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Ключевым элементом современной информационной инфраструктуры, модерации и распространения контента (в том числе противоправного) стала сеть Интернет. Количество пользователей Рунета за последние 15 лет выросло с 25 млн человек (аудитория «ВКонтакте» и «Одноклассников» в 2007 г. насчитывала по 3–4 млн пользователей) до 124 млн россиян (среди них пользователи соцсетей в 2022 г. – почти 100 млн) [1]. Безопасность доступа к интернету обеспечивают средства защиты информации: ими пользуются 78,5 % россиян, при этом почти 30 % населения ежегодно сталкиваются с киберпреступлениями, включая распространение публикаций с запрещенной символикой, в том числе экстремистской направленности. По итогам 2021 г. в России число преступлений экстремистской направленности, включая пропаганду и публичное демонстрирование запрещенной символики, выросло на 39,3 % [2]. В дальнейшем обеспечение безопасного доступа к сети Интернет должны осуществлять не только традиционные антивирусные программы, электронная цифровая подпись и средства аутентификации пользователей, но и инструменты на основе технологий машинного обучения и Интернета вещей и др. [3]. Методы компьютерного зрения дают возможность для автоматизации процессов мониторинга растущего потока информации в сети Интернет на выявление противоправного материала (в частности, запрещенных изображений) [4].

В 2010 г. лучший алгоритм классификации изображений давал ошибку около 27 %. Сегодня алгоритмы классификации изображений позволяют на новом качественном уровне решать задачи компьютерного зрения. Если человек может неправильно классифицировать изображения в некотором наборе данных в 5 % случаев, то ранее алгоритмы классификации показывали до 4,5 % ошибок. В настоящее время количество ошибок снизилось до 3 % [3]. Значительное количество публикаций, связанных с использованием алгоритмов классификации изображений, представлены в таких предметных областях, как контроль качества продукции [5], обнаружение пожаров [6], транспорт [7], медицина [8], экономика и образование [9] и др. Появляются публикации авторов, посвященные методам компьютерного зрения, в области обнаружения и анализа запрещенного контента в сети Интернет [10–12], однако в большей степени они посвящены выявлению текстовой информации. В применении к выявлению изображений наиболее известны следующие методы компьютерного зрения: поиск объекта по шаблону [13], бинарная классификация при помощи свёрточной нейронной сети [14], свёрточные нейронные сети с различными архитектурами [15].

Анализ публикаций показал, что вопросы исследования алгоритмов компьютерного зрения для обнаружения изображений с запрещенной символикой актуальны, но представлены фрагментарно и требуют дальнейшей проработки. В качестве примера для исследования алгоритмов был выбран один из самых распространённых запрещенных символов – свастика. Во многих странах, так же как и в РФ, этот символ запрещен и является пропагандой национализма [16]. Цель работы – разработка и исследование методов классификации и мониторинга в сети Интернет изображений с запрещенной символикой и изображений, похожих на запрещенные, но не являющихся таковыми.

Материалы и методы решения задачи поиска изображений. Задача поиска изображений в применении к различным предметным областям первоначально решалась с использованием традиционных алгоритмов обработки информации (цветовые фильтры, контурный анализ, поиск по шаблону, работа с особыми точками и др.) [17]. Далее появились решения, реализованные в виде разнообразных архитектур классических нейронных сетей [18]. Однако при преобразовании изображений классической нейронной сетью в линейную цепочку байт происходит потеря информации, топологии изображения, при этом нейронная сеть должна быть инвариантной к различным искажениям в данном случае запрещенного изображения. Частота использования классических нейронных сетей в задачах поиска изображений значительно снизилась при появлении свёрточных нейронных сетей [19]. Идея свёрточных нейронных сетей заключается в чередовании свёрточных, субдискретизирующих и наличии полносвязанных слоев на выходе, что позволило осуществлять поиск изображений на новом качественном уровне (рис. 1).



Рисунок 1 – Классификация методов компьютерного зрения

Для сравнительного анализа методов компьютерного зрения, используемых для поиска запрещенной символики на изображениях в сети Интернет, из традиционных методов был выбран метод поиска по шаблону, который в отличие от остальных традиционных методов является универсальным и обладает хорошей обобщающей способностью [13]. Сравнение методов машинного обучения поиска объектов на изображениях, включая классические и свёрточные нейронные сети, показало, что на 1 первом месте находятся свёрточные нейронные сети с 0,39 % ошибок распознавания в общем случае [20]. Поэтому для данного исследования были выбраны именно свёрточные нейронные сети. Наиболее известными моделями свёрточной нейронной сети в последние годы стали: RCNN; FastRCNN; FasterRCNN; SSD; YOLO и др. [19]. При этом наиболее быстрым и точным алгоритмом среди моделей свёрточной нейронной сети считается YOLO [18]. Эти свойства алгоритма YOLO позволяют охватывать все возможные изображения во время тестирования, соответственно получаемые прогнозы основываются на глобальном контексте изображения. Одна из самых популярных и часто используемых моделей YOLO – YOLOv3 была выбрана для исследования [21].

При детекции запрещенных изображений возникает ситуация внешней визуальной схожести некоторых объектов между собой (например, свастики и знака русского националистического единства). Тогда дополнительно необходимо решать задачу поиска отличительных признаков одного объекта от другого. В качестве инструмента для решения этой задачи выбран метод бинарной классификации на основе, как показано выше, преобладающего на сегодняшний день свёрточного типа нейронных сетей [14]. Рассмотрим выбранные методы более детально.

Обнаружение объекта по шаблону является одним из наиболее часто используемых методов компьютерного зрения. По сути, это метод поиска областей изображения I , которые соответствуют некоторому изображению-шаблону T [13]. Для детекции искомой области производят сравнение шаблонного изображения T с исходным изображением I путем перемещения шаблона T по одному пикселю вверх-вниз или слева направо, соответственно фиксируются координаты (x, y) . При этом в каждой точке (x, y) производится расчет метрики расхождения [13], позволяющий получить численную оценку того, насколько «хорошее» совпадение в искомым координатах (или насколько изображение-шаблон T похоже на эту конкретную область исходного изображения I) (табл. 1). Для каждой точки (x, y) перемещения шаблонного изображения T по области изображения I сохраняется численное значение метрики в матрице результатов R .

Следующим методом, выбранным для поиска изображений с запрещенной символикой, является метод бинарной классификации при помощи свёрточной нейронной сети [14]. Как следует из названия, метод является бинарным, то есть в структуре нейронной сети всего два входных нейрона и на выходе выдается ответ: объект 1-го класса или 2-го класса. Метод бинарной классификации при помощи свёрточной нейронной сети хорошо зарекомендовал себя при нахождении отличительных признаков одного объекта относительно другого. Структурная схема данного метода представлена на рисунке 2. На вход подается изображение, после чего обученная свёрточная нейронная сеть предсказывает вероятности w_1 и w_2 принадлежности объекта на изображении к 1-му и 2-му классу. На выходе объявляется принадлежность объекта на изображении в соответствии с наивысшей вероятностью.

Детекция объектов при помощи алгоритма YOLOv3 – метод для определения класса объекта и его расположения на изображении. YOLOv3 представляет собой архитектуру YOLO, состоящую из 106 свёрточных слоев. Алгоритм YOLOv3 сначала разделяет изображение на сетку. Каждая ячейка сетки предсказывает некоторое количество граничных прямоугольников (иногда называемых якорными прямоугольниками) вокруг объектов, которые высоко оцениваются предопределенными классами (рис. 3).

Таблица 1 – Метрики расхождения для метода обнаружения объекта по шаблону

Наименование метрики	Формализация метрики
Сумма квадратов разниц значений пикселей (M1)	$R(x, y) = \sum_{x', y'} (T(x', y') - I(x + x', y + y'))^2$
Сумма квадратов разниц цветов, нормированная в диапазоне 0...1, (M2)	$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') - I(x + x', y + y'))^2}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I(x + x', y + y')^2}}$
Сумма поэлементных произведений шаблона и сегмента картинки (M3)	$R(x, y) = \sum_{x', y'} (T(x', y') \cdot I(x + x', y + y'))$
Сумма поэлементных произведений, нормированная в диапазоне -1...1, (M4)	$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') \cdot I(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I(x + x', y + y')^2}}$
Кросс-корреляция изображений без среднего, (M5)	$R(x, y) = \sum_{x', y'} (T'(x', y') \cdot I'(x + x', y + y'))$
Кросс-корреляция между изображениями без среднего, нормированная в -1...1 (корреляция Пирсона), (M6)	$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T'(x', y') \cdot I'(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} T'(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I'(x + x', y + y')^2}}$



Рисунок 2 – Структурная схема работы бинарной классификации при помощи сверточной нейронной сети

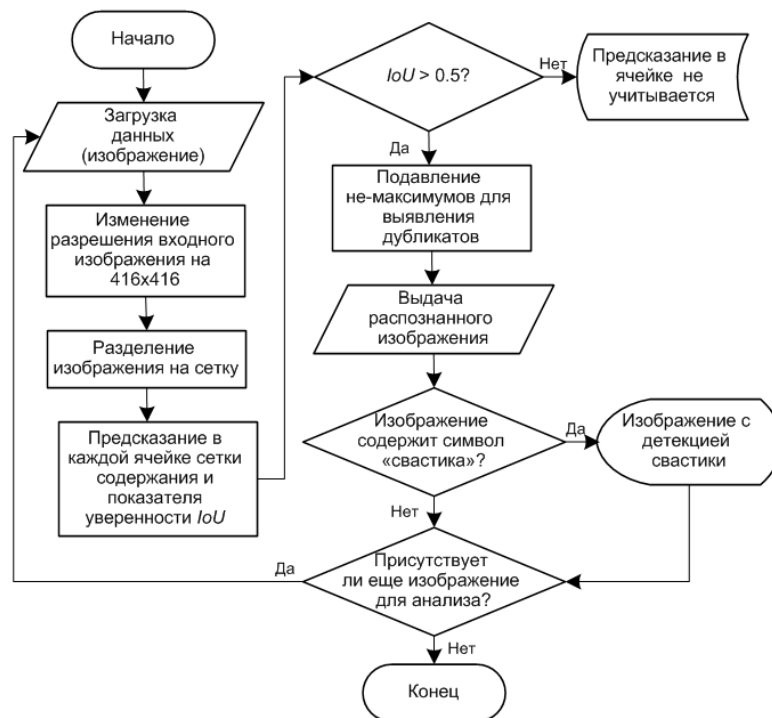


Рисунок 3 – Схема работы алгоритма ПО со сверточной нейронной сети архитектуры YOLOv3

YOLO и другие алгоритмы сверточной нейронной сети позволяют оценивать области на основе их сходства с предопределенными классами, на основе показателя уверенности *Iou* [19]. Области с высокими показателями уверенности *Iou* отмечаются как положительные для обнаружения того класса, с которым они наиболее близко идентифицируются. Например, в прямой трансляции трафика YOLO можно использовать для обнаружения различных видов транспортных средств, учитывая, какие области видео имеют более высокие оценки по сравнению с заранее определенными классами транспортных средств. Переобучив модель YOLOv3 со своим набором данных, существует возможность классифицировать и определять расположение классифицированных объектов на изображении.

Результаты и их обсуждение. Приложение для обнаружения изображений с запрещенной символикой разработано средствами языка программирования общего назначения Python 3.6.5, библиотек машинного обучения Numpy и Matplotlib, а также дополнительно были использованы библиотеки OpenCV для метода поиска по шаблону, TensorFlow – для бинарной классификации при помощи свёрточной нейронной сети, ImageAI, TensorFlow – для свёрточной нейронной сети (модель YOLOv3) [21, 22].

Для объективной оценки всех трех методов был создан трехкомпонентный набор данных, включающий: обучающие данные (train data) в количестве 400 изображений, валидационные данные (validation data) в количестве 100 изображений и тестовые (test data) данные. Тестовый набор данных состоит из 40 тестовых изображений (на 20 изображениях присутствует свастика, на 20 отсутствует), в качестве шаблонов было взято 10 изображений свастики. Данный набор данных будет являться проверочным и позволит выявить наилучший метод для поиска объекта на изображении.

Рассмотрим результаты применения метода поиска объекта по шаблону, имеющего название `matchTemplate` (библиотека Python – OpenCV). Метод поиска объекта по шаблону всего использует 6 метрик расхождений, каждая из которых показала разные результаты при поиске объекта (свастик) (табл. 1 и 2).

Таблица 2 – Результаты поиска объекта при 6 метрик расхождений

Измерения показателей /метрики расхождений (см. таблицу1)	Количество найденных объектов на изображениях		Количество не найденных объектов на изображениях	
	объекты были	объектов не было	объекты были	объектов не было
M1	7	4	13	16
M2	4	5	16	15
M3	7	3	13	17
M4	5	4	15	16
M5	3	3	17	17
M6	3	4	17	16

Анализ данных из таблицы 3 показал, что метрика расхождений M3 (CV_TM_CCORR) является самой эффективной. Однако результаты использования метода поиска объекта по шаблону не те, которые ожидалось. Только в 35 % случаев (7 из 20 изображений) метод поиска объекта по шаблону смог определить присутствие запрещенной символики. В 85 % (17 из 20) метод смог определить, что данная символика отсутствует. Для эффективной работы данного метода потребуется большой словарь шаблонов. При этом допускается то, что ни один из шаблонов, собранных в словарях, не сможет подойти для поиска объекта на изображении.

При реализации метода бинарной классификации при помощи свёрточной нейронной сети обучение моделей классификации производилось при помощи облачного сервиса Google Colaboratory. Для обучения нейронной сети было выбрано 2 класса объектов: свастика и знак русского националистического единства. Сводное представление модели бинарной классификации объектов свастики и знака русского националистического единства представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Сводное представление модели бинарной классификации объектов

Слой	Форма вывода	Параметры
Conv2d_12	(None, 148, 148, 32)	896
Conv2d_13	(None, 72, 72, 64)	18496
Conv2d_14	(None, 34, 34, 128)	73856
Conv2d_15	(None, 15, 15, 128)	147584
Dense_6	(None, 512)	3211776
Dense_7	(None, 1)	513

В таблице 4 и на рисунке 4 представлены результаты обучения модели бинарной классификации при помощи свёрточной нейронной сети на собранном, вышеуказанном наборе данных.

С помощью валидационного набора данных была протестирована обученная нейронная модель бинарной классификации (табл. 5).

Таблица 4 – Таблица ошибки и аккуратности на обучении и валидации

Измерения показате- лей/номер эпохи	Обучающие данные		Валидационные данные	
	Процент ошибки	Процент аккуратности	Процент ошибки	Процент аккуратности
5	41,3	81,3	44,6	78,7
10	31,7	86,6	28,4	87,2
20	12,1	96,2	13	92,3
24	4,1	96,4	3,3	97,3
30	5	97,2	12	94,9

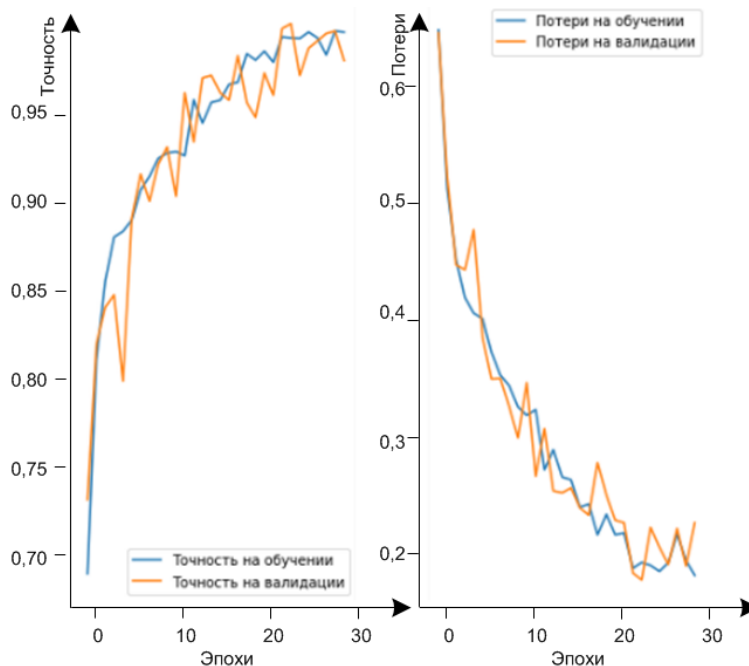


Рисунок 4 – График точности и потерь на обучении и тестировании

Таблица 5 – Результаты поиска объекта при помощи нейронной модели бинарной классификации

Количество найденных объектов на изображениях		Количество не найденных объектов на изображениях	
объекты были	объектов не было	объекты были	объектов не было
19	16	1	4

Из сведений таблицы 5 следует, что обученная модель бинарной классификации на поиск запрещенной символики (в данной работе – свастика) проявила себя успешно в 95 % (19 из 20) случаев, если свастика присутствовала на изображениях. Однако, в случае отсутствия свастики на изображении, только в 20 % (4 случаях из 20) случаев было определено, что соответствующая символика на изображении не присутствует. Модель бинарной классификации на поиск запрещенной символики подходит в том случае, если планируется определить, какой из двух объектов изображен на картинке. Если на вход подается изображение, не относящееся ни к первому классу, ни ко второму, нейронная модель ошибочно предскажет класс объекта на изображении.

При реализации метода обнаружения объектов при помощи свёрточной нейронной сети на основе модели YOLOv3 дополнительно использована библиотека ImageAI, обучающая собственную модель на любом наборе изображений, который соответствует любому типу интересующего объекта.

Для реализации данного метода был собран набор данных и распределен на обучающую (набор для обучения – 80 %) и валидационную выборки (набор для проверки – 20 %). С использованием библиотеки LabelIMG созданы аннотации для каждого изображения в обучающей и валидационной выборке. В итоге структура для дальнейшего обучения нейронной сети должна выглядеть так, как на рисунке 5.

Для качественной классификации и детекции объекта на изображении рекомендуется от 200 изображений, для классификации свастики было принято решение использовать набор данных, равный 500 изображений, соответственно для обучающей выборки $N = 400$ изображений, а для валидационной $K = 100$ изображений (рис. 5). Количество эпох – 20. Размер мини-выборки – 10 (рис. 6).

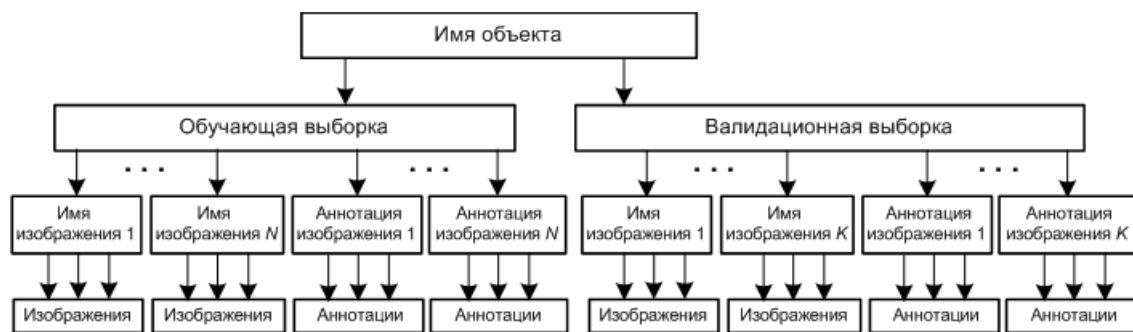


Рисунок 5 – Структура для обучения нейронной сети

```

Epoch 7/20
912/912 [=====] - 1465s 2s/step - loss: 8.2735 - yolo_layer_4_loss: 1.5545 - yolo_layer_5_loss: 2.5663 - yolo_layer_6_loss: 4.1527 - val_loss: 11.2973
Epoch 8/20
912/912 [=====] - 1423s 2s/step - loss: 7.7184 - yolo_layer_4_loss: 1.2945 - yolo_layer_5_loss: 2.3705 - yolo_layer_6_loss: 4.0534 - val_loss: 12.0699
Epoch 9/20
912/912 [=====] - 1441s 2s/step - loss: 7.3607 - yolo_layer_4_loss: 1.2493 - yolo_layer_5_loss: 2.2495 - yolo_layer_6_loss: 3.8619 - val_loss: 8.2071
Epoch 10/20
912/912 [=====] - 1429s 2s/step - loss: 7.2360 - yolo_layer_4_loss: 1.1843 - yolo_layer_5_loss: 2.2575 - yolo_layer_6_loss: 3.7943 - val_loss: 13.0580
Epoch 11/20
912/912 [=====] - 1445s 2s/step - loss: 7.0595 - yolo_layer_4_loss: 1.1889 - yolo_layer_5_loss: 2.1578 - yolo_layer_6_loss: 3.7127 - val_loss: 10.0205
Epoch 12/20
912/912 [=====] - 1447s 2s/step - loss: 6.8807 - yolo_layer_4_loss: 1.1410 - yolo_layer_5_loss: 2.1590 - yolo_layer_6_loss: 3.5806 - val_loss: 10.9176
Epoch 13/20
912/912 [=====] - 1453s 2s/step - loss: 6.9247 - yolo_layer_4_loss: 1.1830 - yolo_layer_5_loss: 2.1552 - yolo_layer_6_loss: 3.5865 - val_loss: 9.8891
Epoch 14/20
912/912 [=====] - 1478s 2s/step - loss: 6.5636 - yolo_layer_4_loss: 1.0637 - yolo_layer_5_loss: 2.0552 - yolo_layer_6_loss: 3.4447 - val_loss: 13.3957
Epoch 15/20
912/912 [=====] - 1476s 2s/step - loss: 6.4045 - yolo_layer_4_loss: 1.0608 - yolo_layer_5_loss: 1.9944 - yolo_layer_6_loss: 3.3492 - val_loss: 18.2127
Epoch 16/20
912/912 [=====] - 1507s 2s/step - loss: 6.3493 - yolo_layer_4_loss: 1.0078 - yolo_layer_5_loss: 2.0261 - yolo_layer_6_loss: 3.3155 - val_loss: 9.3877
Epoch 17/20
912/912 [=====] - 1491s 2s/step - loss: 6.3126 - yolo_layer_4_loss: 1.1045 - yolo_layer_5_loss: 1.9776 - yolo_layer_6_loss: 3.2305 - val_loss: 8.8005
Epoch 18/20
912/912 [=====] - 1497s 2s/step - loss: 6.2321 - yolo_layer_4_loss: 1.0520 - yolo_layer_5_loss: 1.9827 - yolo_layer_6_loss: 3.1974 - val_loss: 6.2218
Epoch 19/20
912/912 [=====] - 1521s 2s/step - loss: 6.1321 - yolo_layer_4_loss: 0.9229 - yolo_layer_5_loss: 1.9656 - yolo_layer_6_loss: 3.2437 - val_loss: 9.2831
Epoch 20/20
912/912 [=====] - 1544s 2s/step - loss: 5.9768 - yolo_layer_4_loss: 0.9409 - yolo_layer_5_loss: 1.9068 - yolo_layer_6_loss: 3.1290 - val_loss: 10.9871
    
```

Рисунок 6 – Обучение нейронной сети с архитектурой YOLOv3

Благодаря наличию валидационной выборки (набору данных для проверки) сразу стало ясно, что после 18 эпохи происходит переобучение модели, процент ошибки на обучающем наборе уменьшается, но процент ошибки на наборе для проверки увеличивается. Нейронная сеть переобучилась, лучше распознает объект на том наборе, на котором она обучалась, но при тестировании обученная модель начинает выдавать результат хуже, чем был на предыдущей эпохе. Этот анализ позволил выяснить, какую эпоху лучше взять в качестве готовой модели.

С помощью проверочного набора данных была протестирована обученная нейронная модель детекции объектов при помощи алгоритма YOLOv3 (табл. 6).

Таблица 6 – Результаты поиска объекта при помощи нейронной модели детекции объектов при помощи алгоритма YOLOv3

Количество найденных объектов на изображениях		Количество не найденных объектов на изображениях	
объекты были	объектов не было	объекты были	объектов не было
19	1	1	19

Анализ сведений, представленных в таблице 6, показал, что данный метод YOLOv3 отлично справился с поставленной задачей. Обученная модель находит запрещенные изображения (свастика) в 95 % (19 из 20) случаев, такой же результат показала модель в случаях, где символ отсутствует.

Матрицы ошибок всех трех методов представлены на рисунке 7. По точности определения объекта (свастика), когда объект присутствовал на изображении, когда отсутствовал, лучше всего себя показала сверточная нейронная сеть YOLOv3.



Рисунок 7 – Матрицы ошибок для тестового набора для алгоритмов поиска по шаблону, бинарной классификации сверточной нейронной сети, YOLOv3

Модель детекции объектов при помощи алгоритма YOLOv3, обученная на наборе данных из 500 изображений, в итоге способна классифицировать объект «свастика» на изображениях и также показать отсутствие данного символа. Дополнительные настройки модели позволяют повысить процент эффективности.

Заключение. По результатам сформулированной цели исследования и поставленной задачи были проведены исследования трех методов компьютерного зрения, включая методы поиска объекта по шаблону, бинарной классификация при помощи сверточной нейронной сети, модели YOLOv3. Данные методы были изучены и протестированы на решении задачи поиска запрещенной символики на изображении. Был сделан вывод, что модель детекции объектов при помощи алгоритма YOLOv3, обученная на наборе данных с 500 изображениями, в итоге способна была классифицировать объект «свастика» на изображении и также показать отсутствие данной символики. Метод детекции объектов при помощи алгоритма YOLOv3 показал точность определения присутствия и отсутствия свастики на тестовом наборе данных, равную 95 %. Предложенные исследования методов компьютерного зрения можно распространить на поиск изображений различного характера. Метод поиска по шаблону может быть применен для обнаружения транспортных средств, прокладки маршрутов для мобильных роботов, производственных процессов и в медицине. Сверточные нейронные сети способны успешно распознавать символы на бумаге и банковских картах, подписи на официальных документах, детектировать объекты и т.д. Такие возможности позволяют существенно облегчить труд человека, а также повысить надежность и точность различных рабочих процессов за счет отсутствия возможности допущения ошибки из-за человеческого фактора.

Библиографический список

1. Тенденции развития интернета: готовность экономики и общества к функционированию в цифровой среде: аналитический доклад / Г. И. Абдрахманова, М. Д. Ванюшина, К. О. Вишневецкий, Л. М. Гохберг и др. ; АНО «Координационный центр национального домена сети Интернет» ; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – Москва : НИУ ВШЭ, 2021. – 248 с.
2. Выявлено лиц, совершивших преступления экстремистской направленности. – Режим доступа: http://crimestat.ru/offenses_chart, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз.рус. (дата обращения: 06.03.2022).
3. Бурцев, М. История искусственного интеллекта // БИТ. Бизнес & Информационные технологии. – 2019. – № 6 (89). – С. 26–27.
4. Адамова, А. А. Методы и технологии машинного обучения и нейросетевых технологий в задачах компьютерного зрения / А. А. Адамова, В. А. Зайкин, Д. В. Гордеев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 25–39.
5. Сириченко, А. В. Применение технологии компьютерного зрения для решения задачи контроля качества продукции в машиностроении / А. В. Сириченко // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2019. – № 7. – С. 167–169.
6. Катаев, М. Ю. Метод компьютерного зрения для обнаружения лесных пожаров по rgb-изображениям, получаемым с помощью беспилотного моторного планёра / М. Ю. Катаев, Е. Ю. Карташов // Светотехника. – 2021. – № 2. – С. 15–20.
7. Редин, И. В. Анализ методов компьютерного зрения для создания системы автоматического управления дорожным транспортом / И. В. Редин, В. А. Шеин // Colloquium-journal. – 2019. – № 27–1 (51). – С. 70–72.
8. Шагалова, П. А. Алгоритмы компьютерного зрения в задаче обработки серии медицинских снимков, полученных при микроскопии / П. А. Шагалова, Э. С. Соколова, Г. Я. Левин, А. Ю. Захарова, В. С. Коротаев, Г. В. Куликов // Cloud of Science. – 2020. – Т. 7, № 1. – С. 180–188.
9. Онокой, Л. С. Применение технологий компьютерного зрения в экономике и образовании / Л. С. Онокой, Е. А. Морев // Дискуссия. – 2021. – № 1 (104). – С. 24–30.
10. Шарнин, М. М. Единая автоматизированная технология обнаружения и анализа экстремистского контента в интернете / М. М. Шарнин, А. Х. Хакимова, И. В. Родина, А. А. Маравин, А. С. Гуров // SCVRT2018 Международная научная конференция Московского физико-технического института (государственного университета) Института физико-технической информатики : труды Международной научной конференции. – 2018. – С. 49–58.
11. Давыдов, В. О. Выявление информации экстремистской направленности в электронных информационных сетях в целях раскрытия и расследования преступлений / В. О. Давыдов // Известия ТулГУ. Экономические и юридические науки. – 2011. – № 2–2. – С. 90–94.
12. Колесников, И. Е. Основные вопросы разработки модуля определения специальной символики на изображениях социальной сети / И. Е. Колесников, О. С. Смирнова // Проблемы науки. – 2017. – № 24 (106). – С. 8–12.
13. Утев, Д. А. Анализ инвариантности мер близости для поиска объекта по шаблону при вращении и масштабировании изображения / Д. А. Утев, И. В. Борисова, В. П. Ющенко // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 100–106.
14. Бирюкова, В. А. Технология дистилляции знаний для обучения нейронных сетей на примере задачи бинарной классификации / В. А. Бирюкова // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 23–52.
15. Girshick, Ross. Region-Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation / Girshick, Ross & Donahue, Jeff & Darrell, Trevor & Malik, Jitendra // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2015. – Vol. 38, № 1–1. – DOI: 10.1109/TPAMI.2015.2437384.
16. Рыдченко, К. Д. Некоторые особенности обеспечения запрета пропаганды и публичного демонстрирования нацистской атрибутики и символики / К. Д. Рыдченко // Вестник Воронежского института МВД России. – 2009. – № 2. – С. 60–65.
17. Романов, С. А. Анализ методов распознавания изображений / С. А. Романов, Ю. П. Стоянов // Перспективы развития информационных технологий. – 2010. – № 2. – С. 334–338.
18. Брилюк, Д. Распознавание человека по изображению лица и нейросетевые методы / Д. Брилюк, В. Старовойтов. – Минск : Институт технической кибернетики Национальной академии наук Беларуси, 2001.
19. Сирота, А. А. Анализ алгоритмов поиска объектов на изображениях с использованием различных модификаций сверточных нейронных сетей / А. А. Сирота, Е. Ю. Митрофанова, А. И. Милованова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2019. – № 3. – С. 123–137.

20. Ranzato, Marc'Aurelio. Efficient Learning of Sparse Representations with an Energy-Based Model / Ranzato Marc'Aurelio, Christopher Poultney, Sumit Chopra and Yann LeCun // *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2006)* / J. Platt et al. (eds). – MIT Press, 2006.

21. Кравцов, Е. В. Методика распознавания объектов при помощи сверточной нейронной сети YOLOV3 / Е. В. Кравцов, Д. Ю. Невров, Д. А. Селитренников // *Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы : сборник материалов Международной научно-практической конференции : в 2 т. – Воронеж, 2020. – С. 301–304.*

22. Джоши, П. Искусственный интеллект с примерами на Python / П. Джоши. – Москва : Диалектика ; Вильямс, 2019. – 448 с.

References

1. Abdrakhmanova, G. I., Vanyushina, M. D., Vishnevskiy, K. O., Gokhberg, L. M. et al. *Tendentsii razvitiya interneta: gotovnost ekonomiki i obshchestva k funkcionirovaniyu v tsifrovoy srede: analiticheskiy doklad* [Trends in the development of the Internet: the readiness of the economy and society to function in the digital environment: analytical report]. ANO "Coordination Center of the National Domain of the Internet" ; National Research University "Higher School of Economics". Moscow, National Research University "Higher School of Economics", 2021. 248 p.

2. *Vyyavleno lits, sovershivshikh prestupleniya ekstremistskoy napravlenosti* [Persons who committed extremist crimes were identified]. Available at: http://crimestat.ru/offenses_chart (accessed 06.03.2022).

3. Burtsev, M. Istoriya iskusstvennogo intellekta [The History of Artificial Intelligence]. *BIT. Biznes & Informatsionnyye tekhnologii* [BIT. Business & Information Technologies], 2019, no. 6 (89), pp. 26–27.

4. Adamova, A. A., Zaikin, V. A., Gordeev, D. V. Metody i tekhnologii mashinnogo obucheniya i neyrosetevykh tekhnologiy v zadachakh kompyuternogo zreniya [Methods and technologies of machine learning and neural network technologies in computer vision problems]. *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputers: development, application], 2021, vol. 23, no. 4, pp. 25–39.

5. Sirichenko, A. V. Primeneniye tekhnologii kompyuternogo zreniya dlya resheniya zadachi kontrolya kachestva produktsii v mashinostroyenii [Application of computer vision technology to solve the problem of product quality control in mechanical engineering]. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye v mashinostroyenii* [Computer-aided design in mechanical engineering], 2019, no. 7, pp. 167–169.

6. Kataev, M. Yu., Kartashov, E. Yu. Metod kompyuternogo zreniya dlya obnaruzheniya lesnykh pozharov po rgb-izobrazheniyam, poluchayemykh s pomoshchyu bespilotnogo motornogo planera [Computer vision method for detecting forest fires using RGB images obtained using an unmanned motor glider]. *Svetotekhnika* [Lighting engineering], 2021, no. 2, pp. 15–20.

7. Redin, I. V., Shein, V. A. Analiz metodov kompyuternogo zreniya dlya sozdaniya sistemy avtomaticheskogo upravleniya do-rozhnym transportom [Analysis of computer vision methods for creating an automatic road transport control system]. *Colloquium-journal*, 2019, no. 27–1 (51), pp. 70–72.

8. Shagalova, P. A., Sokolova, E. S., Levin, G. Ya., Zakharov, A. Yu., Korotaev, V. S., Kulikov, G. V. Algoritmy kompyuternogo zreniya v zadache obrabotki serii meditsinskikh snimkov, poluchennykh pri mikroskopii [Algorithms in the task of processing a series of medical images obtained by microscopy]. *Cloud of Science*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 180–188.

9. Onokhoy, L.S., Morev, E. A. Primeneniye tekhnologiy kompyuternogo zreniya v ekonomike i obrazovanii [The use of computer vision technologies in Economics and education]. *Diskussiya* [Discussion], 2021, no. 1 (104), pp. 24–30.

10. Sharnin, M. M., Khakimova, A. H., Rodina, I. V., Maravin, A. A., Gurov, A. S. Sharnin, M. M. Yedinaya avtomatizirovannaya tekhnologiya obnaruzheniya i analiza ekstremistskogo kontenta v internete Unified automated technology for detecting and analyzing extremist content in the Internet. *SCVRT2018 Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta (gosudarstvennogo universiteta) Instituta fiziko-tekhnicheskoy informatiki : trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [SCVRT2018 International Scientific Conference of the Moscow Institute of Physics and Technology (State University) Institute of Physics and Technology Informatics : Proceedings of the International Scientific Conference], 2018, pp. 49–58.

11. Davydov, V. O. Vyyavleniye informatsii ekstremistskoy napravlenosti v elektronnykh informatsionnykh setyakh v tselyakh raskrytiya i rassledovaniya prestupleniy [Identification of extremist information in electronic information networks for the purpose of disclosure and investigation of crimes]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomicheskiye i yuridicheskiye nauki* [News of Tula State University. Economic and Legal Sciences], 2011, no. 2–2, pp. 90–94.

12. Kolesnikov I. E., Smirnova O. S. Osnovnyye voprosy razrabotki modulya opredeleniya spetsialnoy simvoliki na izobrazheniyakh sotsialnoy seti [The main issues of developing a module for determining special symbols on images of a social network]. *Problemy nauki* [Problems of Science], 2017, no. 24 (106). pp. 8–12.

13. Utev, D. A., Borisova, I. V., Yushchenko, V. P. Analiz invariantnosti mer blizosti dlya poiska obyektov po shablonu pri vrashchenii i masshta-birovaniy izobrazheniya [Analysis of the invariance of proximity measures for searching for an object by a template during image rotation and scaling]. *Interexpo Geo-Siberia*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 100–106.

14. Biryukova V.A. Tekhnologiya distillyatsii znaniy dlya obucheniya neyronnykh setey na primere zadachi binarnoy klassifikatsii [Technology of knowledge distillation for training neural networks on the example of a binary classification problem]. *Intellektualnyye sistemy. Teoriya i prilozheniya* [Intelligent systems. Theory and applications], 2020, vol. 24, no. 2, pp. 23–52.

15. Girshick, Ross & Donahue, Jeff & Darrell, Trevor & Malik, Jitendra. Region-Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, vol. 38, no. 1–1. DOI: 10.1109/TPAMI.2015.2437384.

16. Rydchenko, K. D. Nekotoryye osobennosti obespecheniya zapreta propagandy i publichnogo demonstrirovaniya natsistskoy atributiki i simvoliki [Some features of ensuring the prohibition of propaganda and public display of Nazi paraphernalia and symbols]. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* [Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 2009, no. 2, pp. 60–65.

17. Romanov, S. A., Stoyanov, Yu. P. Analiz metodov raspoznavaniya izobrazheniy [Analysis of image recognition methods]. *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologiy* [Prospects for the development of information technologies], 2010, no. 2, pp. 334–338.

18. Brilyuk, D., Starovoytov, V. Raspoznavaniye cheloveka po izobrazheniyu litsa i neyrosetevyye metody [Recognition of a person by facial image and neural network methods]. Minsk, Institute of Technical Cybernetics of the National Academy of Sciences of Belarus, 2001.

19. Sirota, A. A., Mitrofanova, E. Yu., Milovanova, A. I. Analiz algoritmov poiska obyektov na izobrazheniyakh s ispolzovaniyem razlichnykh modifikatsiy svertochnykh neyronnykh setey [Analysis of algorithms for searching objects in images using various modifications of convolutional neural networks]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies], 2019, no. 3, pp. 123–137.

20. Ranzato, Marc'Aurelio, Christopher, Poultney, Sumit, Chopra and Yann, LeCun. Efficient Learning of Sparse Representations with an Energy-Based Model. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2006)*, MIT Press, 2006.

21. Kravtsov, E. V., Nevrov, D. Yu., Selitrennikov, D. A. Metodika raspoznavaniya obyektov pri pomoshchi svertochnoy neyronnoy seti YOLOV3 [Object recognition technique using convolutional neural network YOLOV3]. *Tekhnika i bezopasnost obyektov ugovovno-ispolnitelnoy sistemy : sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technique and safety of objects of the penal system : collection of materials of the International Scientific and Practical Conference], in 2 vol. Voronezh, 2020, pp. 301–304.

22. Dzhoshi, P. *Iskusstvennyy intellekt s primerami na Python* [Artificial intelligence with examples in Python]. Moscow, Dialektika Publ. ; Vilyams Publ., 2019. 448 p.

УДК 004.93

АЛГОРИТМ БЫСТРОГО НАХОЖДЕНИЯ КОНТУРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА СЛЕДОВАНИЯ ЗА ПИКСЕЛЯМИ

Статья поступила в редакцию 30.03.2022, в окончательном варианте – 28.04.2022.

Конаныхина Татьяна Николаевна, Юго-Западный государственный университет, 305014, Российская Федерация, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-2755-0163, e-mail: govtn@mail.ru

Конаныхин Александр Юрьевич, Юго-Западный государственный университет, 305014, Российская Федерация, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94,

аспирант, ORCID: 0000-0003-1644-6675, e-mail: alexanderkonan@yandex.ru

Авилов Иван Александрович, Юго-Западный государственный университет, 305014, Российская Федерация, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94,

студент, ORCID: 0000-0001-8884-7705, e-mail: vano94600@gmail.com

Предложен алгоритм быстрого нахождения контура, в основе которого находится метод следования за пикселями изображения. Отслеживание и извлечение контурных пикселей широко используется в различных областях человеческой деятельности, анализ литературы говорит о постоянном увеличении применения этих методов в связи с ростом носимой электроники и постоянным совершенствованием самих алгоритмов трассировки. Традиционные способы отслеживания пикселей имеют определенные ограничения, некоторые алгоритмы, выполняют ненужные операции перемещения над белыми пикселями, что увеличивает время обработки изображения и нахождения контура. Не все алгоритмы могут определять контур в случае угловых пикселей; следовательно, они не могут быть описательной характеристикой объекта и определять связь между объектами. Предложенный алгоритм определяет пиксели внутреннего-внешнего угла, переднего-внутреннего угла и передней прямой линии. При экспериментальной проверке работоспособности предложенного алгоритма и сравнении качества его работы с различными алгоритмами (простой граничный повторитель, модифицированный простой граничный повторитель, трассировка соседей Мура, алгоритм радиальной развертки) предложенный алгоритм определил 99,4 % от общего числа пикселей контура и имеет максимальное общее количество трассируемых пикселей в сравнении с другими анализируемыми алгоритмами трассировки.

Ключевые слова: нахождение контура, алгоритм трассировки, распознавание изображений, метод отслеживания пикселей

ALGORITHM FOR FAST FINDING THE CONTOUR BASED ON THE PIXEL FOLLOWING METHOD

The article was received by the editorial board on 30.03.2022, in the final version – 28.04.2022.

Konanykhina Tatyana N., Southwest State University, 94 50 let Oktyabrya St., Kursk, 305014, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0002-2755-0163, e-mail: govtn@mail.ru

Konanykhin Alexander Yu., Southwest State University, 94 50 let Oktyabrya St., Kursk, 305014, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID 0000-0002-2755-0163, e-mail: govtn@mail.ru

Avilov Ivan A., Southwest State University, 94 50 let Oktyabrya St., Kursk, 305014, Russian Federation,

student, ORCID 0000-0001-8884-7705, e-mail: vano94600@gmail.com

An algorithm for fast contour finding is proposed, which is based on the method of following image pixels. Edge pixel tracking and extraction are widely used for smart devices in object detection, logo recognition, object separation from their

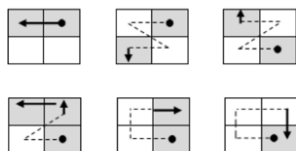
background, object size calculation, shape classification, object feature point finding by edge length and shape, etc. Traditional pixel tracking methods have certain limitations, some algorithms perform unnecessary moving operations on white pixels, which increases the time of image processing and finding the contour. Not all algorithms can determine the contour in the case of corner pixels; therefore, they cannot be a descriptive characteristic of an object and define a relationship between objects. The proposed algorithm determines the pixels of the inner-outer corner, the front-inner corner, and the front straight line. During the experiments, the accuracy of pixel detection on the test image was compared by the proposed algorithm and other algorithms (simple edge repeater, modified GWP, Moore neighbor tracing, radial sweep algorithm), the proposed algorithm determined 99.4 % of the total number of contours pixels and has the maximum total number of traced pixels compared to other tracing algorithms.

Keywords: contour finding, tracing algorithm, image recognition, pixel tracking method

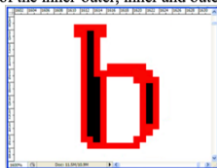
Graphical annotation (Графическая аннотация)



Изображение трассированное с помощью алгоритма МППГ
(не обнаружены пиксели внутреннего угла)
Image traced using the MPPG algorithm
(no inner corner pixels detected)



Траектории поиска пикселей предложенным алгоритмом, способным отследить пиксели на прямой, пиксели внутренне-внешнего, внутреннего и внешнего угла
Pixel search trajectories by the proposed algorithm, capable of tracking pixels on a straight line, pixels of the inner-outer, inner and outer corner



Изображение трассированное с помощью предложенного алгоритма
Image traced using the proposed algorithm

Введение. Обнаружение контуров является важной научно-технической задачей, которая в настоящий момент находит широкое применение в различных областях человеческой деятельности [1–4].

В настоящий момент с увеличением количества носимой электроники и увеличением вычислительной мощности персональных мобильных устройств (мобильных телефонов, смарт-часов) все более актуальной является задача создания алгоритмов быстрого нахождения контуров на изображениях, которые позволяют уменьшать объем хранимой и обрабатываемой информации в виду хоть и возросших, но ограниченных аппаратных ресурсов мобильной техники, но при этом позволяющих увеличить качество распознавания объекта (символа, логотипа, лиц и т.д.). Так как данная область исследований является актуальной и имеет широкое применение, поэтому было создано достаточно большое количество алгоритмов трассировки контуров объектов, но предложенные алгоритмы имеют ряд ограничений и недостатков. Например, большинство алгоритмов не пропускают контурные пиксели, то есть не обладают достаточной точностью распознавания, некоторые алгоритмы трассировки проходят несколько раз по одним и тем же пикселям, что приводит к увеличению времени обработки изображения при отслеживании пикселя, большая часть алгоритмов либо совсем не предусматривает сжатие данных или имеет неточности при восстановлении контура из сохраненной сжатой информации.

Обзор существующих решений. Чаще всего для трассировки необходимо сначала сделать изображение бинарным, так как большинство алгоритмов основаны на том, что контур – это черные пиксели, а фон – белые. Следовательно, если черный пиксель относится к контуру, то рядом с ним обязательно находится хотя бы один пиксель белого цвета [1, 2].

Алгоритмы нахождения контура делятся на алгоритмы, отслеживающие пиксели, вершины (угловые пиксели), и алгоритмы, отслеживающие контурные пиксели на основании данных прогона всех пикселей изображения. Метод отслеживания пикселей в настоящий момент является самым распространенным [1, 2]. Методы, относящиеся к данной группе методов, отслеживают пиксели согласно определенному правилу, например, проверяются все пиксели по часовой стрелке от уже найденного пикселя контура, далее координаты пикселей сохраняются в памяти в соответствии с порядком их обнаружения. К таким методам относятся простой граничный повторитель (ППП), модифицированный ППП (МППП), алгоритм радиальной развертки (АРР), трассировка соседей Мура (ТСМ) [1–3]. Данные методы обнаруживают пиксели

контура на основе цепного кода и работают на основе достаточно простых правил трассировки, сохраняют только координаты идентифицированных контурных пикселей, то есть для запоминания результатов трассировки требуют меньше памяти, объем которой составляет размер кадра и менее.

К методам, требующим для сохранения результатов трассировки меньший объем памяти, относятся методы группы отслеживания вершин, потому что они отслеживают только угловые пиксели контура, а также то, как эти угловые пиксели соединены между собой. Данные методы также используют цепной код и позволяют уменьшить количество точек, которые необходимо запомнить для сохранения найденного контура.

Две первые группы методов находят контурные пиксели, не сканируя при этом все пиксели изображения, последовательность отслеживания генерируется автоматически по определенному правилу. Но данные алгоритмы не подходят для больших изображений, потому что они могут содержать большое количество контуров, что приведет к выполнению большого количества операций [2, 5, 6]. Это в свою очередь приведет к тому, что выполнение программы, работающей по таким алгоритмам, потребует большой объем памяти, чем если бы эта программа работала на основании алгоритма, основанного на группе методов, приведенных ниже.

Методы отслеживания контурных пикселей на основе данных прогона сложнее других методов, но в случае с большими изображениями они позволяют увеличить скорость обработки, поскольку все пиксели сканируются один раз, что не приводит к необходимости совершать дополнительные операции. Так как у объекта могут быть как внешний, так и несколько внутренних контуров, то можно выделить пять типов данных, которые могут быть получены после прогона: левый край внешнего контура, правый край внешнего контура; левый край внешнего контура, левый край внутреннего контура; правый край внутреннего контура, левый край внутреннего контура; правый край внутреннего контура, правый край внешнего контура и левый край внешнего контура. Для отслеживания контура метод отслеживания контурных пикселей строит отношение следования за прогоном между краевыми точками двух соседних строк сканирования [1, 2, 3]. К данным методам можно отнести метод кода RD и метод OpenCV [1, 4, 7, 8].

Рассмотрим общие принципы работы трассировщиков всех вышеприведенных типов. Пусть A является бинарным изображением размером $X \times Y$. Большинство алгоритмов отслеживания контуров используют трассер $T(P, d)$ с абсолютной информацией о направлении $d \in \{N, NE, NW, W, SW, S, SE, E, NE\}$. Трассировщик начинает работу после нахождения и сохранения первой точки контура и определения направления трассировки. Следующая точка контура определяется трассировщиком по определенному правилу, после чего трассер перемещается в обнаруженную точку и определяется дальнейшее направление следования. Следующая точка изображения может оказаться как точкой контура, так и точкой фона. Чтобы понять это, необходимо определить интенсивность пикселя и новое абсолютное направление dr , используя информацию об относительном направлении $r \in \{\text{спереди, спереди – слева, слева, сзади – слева, сзади, сзади – справа, справа, спереди – справа}\}$ [1, 2, 9, 10]. При возвращении трассировщика в начальную точку процедура обнаружения контуров заканчивается, то есть это является правилом остановки.

Можно выделить четыре типа пикселей контура (рис. 1): пиксель, принадлежащий прямой линии, внутренний угол, внешний угол, пиксель внутренне-внешнего угла.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0										
1			1	1						
2			4	4				1	1	
3			1	3				3	1	
4					3	4	3			
5				1	2		4			
6			1	2			4			
7				1	2		4			
8					1	4	1			
9										

Рисунок 1 – Типы пикселей контура: пиксель внешнего угла (1), пиксель внутреннего угла (2), пиксель внутреннего-внешнего угла (3), пиксель, принадлежащий ребру (прямой линии) (4)

Рассмотрим недостатки и ограничения самых распространенных современных алгоритмов трассировки, которые подходят для обработки изображений мобильными вычислительными системами в реальном времени.

Простейшим алгоритмом отслеживания контуров является простой граничный повторитель. В различной литературе можно встретить названия алгоритма черепахи Пейперта или отслеживания квадратов [1, 2, 11, 12]. Данный алгоритм приведен на рисунке 2 и обладает значительными недостатками, он не может идентифицировать пиксели контура, которые расположены во внутренне-внешнем углу,

если трассировщик находится впереди справа от искомого пикселя. Для устранения данного ограничения применяется модифицированный ППП [2, 13], но попытки отследить упущенные алгоритмом ППП пиксели приводят к тому, что трассировщик перемещается как по пикселям контура, так и по пикселям фона, что ведет к увеличению времени трассировки, а также этот метод не позволяет отследить пиксели внутреннего угла, если они находятся перед трассировщиком.

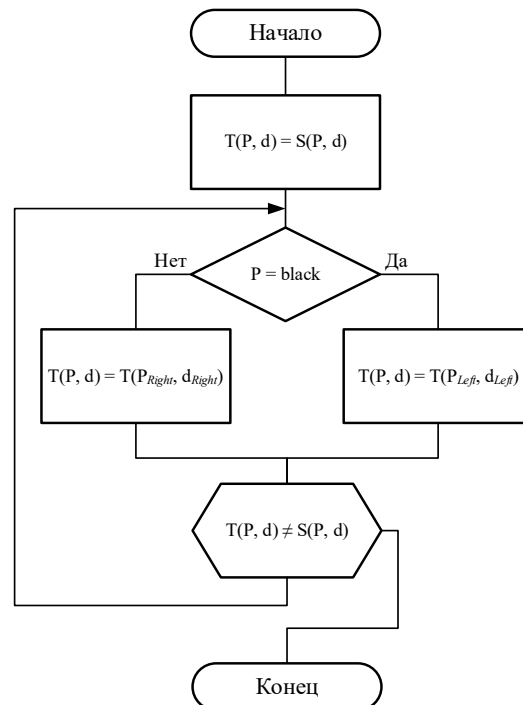


Рисунок 2 – Алгоритм простого граничного повторителя

ТСМ начинает трассировку с заднего пикселя, то есть трассер сначала движется назад, а затем начинает проверку соседних пикселей по часовой стрелке, используя восемь связанных кодов, проверяются задний левый, левый, передний левый, передний, правый передний, правый и правый задний пиксели [5, 6].

APP похож на ТСМ, но его трассировщик не имеет информации о направлении, он поддерживает две точки: предыдущий пиксель и текущий пиксель для определения начального направления трассировки [1, 13].

Оба этих метода не позволяют отследить внутренние углы. Поэтому актуальной является задача создания улучшенного алгоритма, преодолевающего эти ограничения [14].

Алгоритм нахождения контура, преодолевающий указанные ограничения. Данный алгоритм (рис. 3) имеет шесть вариантов отслеживания пикселей контура на основе локальных шаблонов (рис. 4).

Процесс трассировки начинается после того, как трассером будет обнаружен первый черный пиксель, далее поиск следующего контурного пикселя происходит по нижеследующим правилам.

1. На первом этапе проверяется интенсивность соседнего левого пикселя. Если он белый, переходим к этапу 2, если он черный, то необходимо проверить, есть ли рядом с ним хотя бы один белый пиксель, если он отсутствует, то обнаруженный пиксель не является контурным, трассировщик остается на месте $T(P, d) = T(P, d_{Front})$, если белый пиксель обнаружен рядом с только что найденным черным пикселем, обнаруженный пиксель является соседним левым пикселем контура (рис. 4а), трассировщик перемещается на этот пиксель $T(P, d) = T(P_{Left}, d_{Left})$, абсолютное направление трассировки изменяется на left, после нахождения любого контурного пикселя необходимо перейти в пункт 6, затем цикл проверок начинается сначала, если выполнено условия $T(P, d) \neq S(P, d)$, то есть мы снова проверяем интенсивность соседнего левого пикселя, если он белый, то мы переходим ко 2 пункту и т.д.

2. Определяется интенсивность пикселей, находящихся слева сзади и сзади от ранее обнаруженного пикселя контура. Если левый задний пиксель черный, а задний пиксель белый, то мы обнаружили внутренне-внешний угол, который находится слева внизу (сзади) от ранее обнаруженного контурного пикселя (рис. 4б), трассер перемещается $T(P, d) = T(P_{Left-Rear}, d_{Rear})$. Абсолютное направление трассировки изменяется на Rear.

3. Если интенсивность какого-либо из двух пикселей иная, трассировщик проверяет передний левый пиксель, если он черный, переходим в пункт 4, если белый – в пункт 5.

4. Мы имеем дело либо с внутренним углом, который находится впереди от ранее трассируемого пикселя контура (рис. 4г), либо с внутренне-внешним углом, который находится спереди слева от ранее обнаруженного контурного пикселя (рис. 4в), если он белый, то необходимо перейти к пункту 4. Для того чтобы понять это, необходимо проверить интенсивность переднего пикселя, если он черный, то обнаружен случай, приведенный на рисунке 4г, трассер перемещается сначала на один пиксель вперед, помечая его пикселем контура $T(P, d) = T(P_{Front}, d)$, затем сразу на один пиксель влево $T(P, d) = T(P_{Left}, d)$, то есть обнаружено два контурных пикселя. Если передний пиксель оказался белым, то идентифицирован случай, приведенный на рисунке 4в, трассер перемещается по диагонали вперед-влево $T(P, d) = T(P_{Front-Left}, d)$.

5. Необходимо проверить интенсивность переднего пикселя. Если он черный, то мы обнаружили передний соседний пиксель (рис. 4д), абсолютное направление трассировщика изменяется на Right, трассер перемещается вперед, помечая пиксель как контурный $T(P, d) = T(P_{Front}, d_{Rear})$. Если передний пиксель белый, то мы обнаружили пиксель внешнего угла, трассер не перемещается $T(P, d) = T(P, d_{Rear})$, абсолютное направление трассировщика изменяется на Rear. Далее запускается подпрограмма поиска контурных пикселей справа от текущего пикселя.

6. После обнаружения каждого следующего контурного пикселя обязательно происходит проверка, не перешли ли мы в ходе трассировки на начальный пиксель контура (пиксель, с которого алгоритм начал свою работу). Если это произошло $T(P, d) = S(P, d)$, мы получили замкнутый контур. Далее начинает работу алгоритм поиска первого пикселя следующего контура. Если в ходе проверки трассер не переместился, а остался в начальной точке, то алгоритм продолжает свою работу.

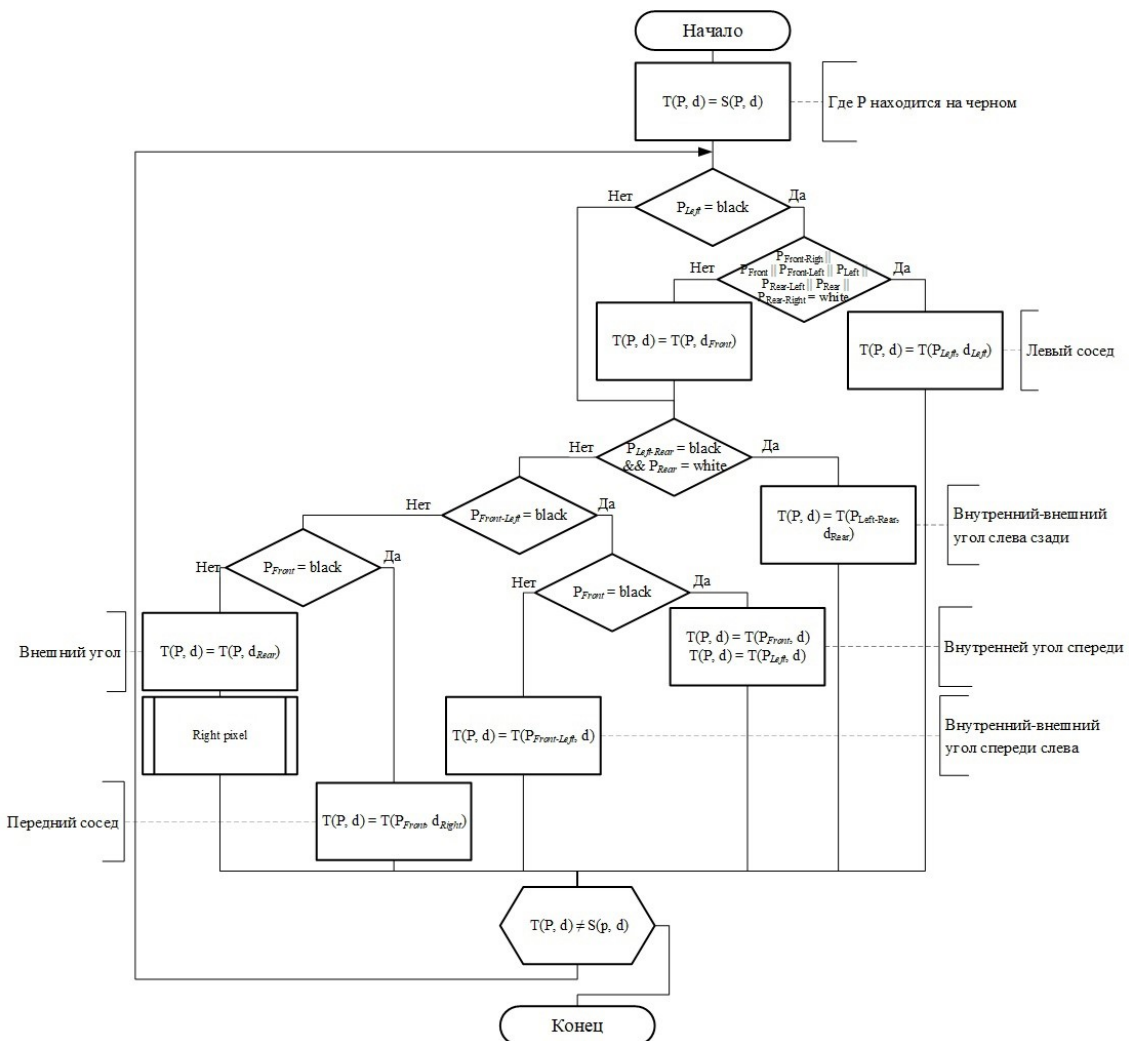


Рисунок 3 – Предложенный улучшенный алгоритм трассировки контура

Алгоритм ППП не способен выполнить трассировку случая 4б и 4г, а МППП не может обнаружить пиксель контура в случае, показанном на 4г, предложенный алгоритм успешно выполняет трассировку во всех случаях. Также предложенный алгоритм не просто позволяет находить контурные пиксели, а способен идентифицировать найденный пиксель как пиксель прямой линии или угловой пиксель (внутренний-внешний угол; внутренний угол; внешний угол). В дальнейшем эту информацию предполагается использовать для уменьшения объема памяти, используемой для хранения данных о контуре, за счет того, что достаточно хранить только репрезентативные точки контура, из которых впоследствии можно восстановить весь контур.

На рисунке 4 пунктирной линией показано направление поиска пикселя контура трассировщиком, т.е. получение информации о том, является ли пиксель черным или белым, но при этом не происходит перемещение трассировщика. Трассировщик перемещается только при обнаружении следующего контурного пикселя, не перемещаясь по белым пикселям, что уменьшает время трассировки, также объем хранимой после трассировки информации. Точкой показан текущий пиксель, который уже определен как элемент контура, стрелкой показан целевой пиксель контура, т.е. пиксель, который мы пытаемся обнаружить.

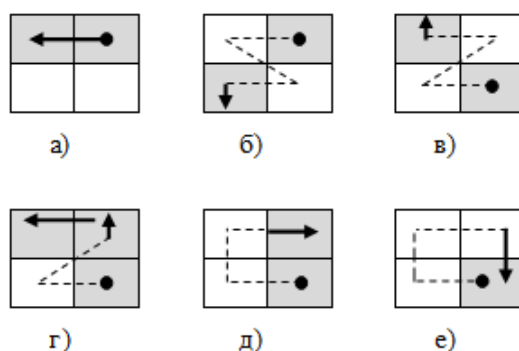


Рисунок 4 – Траектории поиска пикселей контура предложенным алгоритмом, обнаружение: (а) соседнего левого пикселя; (б) внутреннего-внешнего угла слева сзади; (в) внутреннего-внешнего угла спереди слева; г) внутреннего угла спереди; д) переднего соседа; е) внешнего угла

Алгоритм отслеживания пикселей требует критериев запуска и остановки, чтобы избежать неполного или бесконечного цикла отслеживания.

Трассировка начинается, когда трассировщик переходит с белого пикселя в черный, это означает, что для начала работы алгоритма трассировщик должен находиться на черном пикселе, перейдя в него из белого. Предлагается использовать критерий остановки Джейкоба [1, 2], который завершает трассировку, когда трассировщик повторно входит в начальный пиксель с абсолютным направлением, совпадающим с начальным направлением, т.е. трассировка заканчивается в начальном пикселе.

Анализ точности трассировки предложенного алгоритма в сравнении с имеющимися решениями. Точность трассировки контуров показывает, насколько качественно алгоритм находит все контурные пиксели на исследуемом изображении. Для этого мы проверяем работу алгоритмов на тестовых изображениях, отмечаем найденные алгоритмом пиксели, затем подсчитываем все пиксели контура. Если пиксель трассируется несколько раз, то учитывается в статистике он только один раз.

В ходе исследования качество работы предложенного алгоритма проверялось на изображениях, содержащих символическую информацию (текст на русском, английском, комбинации английского и китайского языков).

В таблице представлены результаты сравнения предложенного алгоритма с традиционными. Столбец «Общее количество» в таблице подразумевает общее количество пикселей контура на изображении, включая внутренний угол, внешний угол, внутренний-внешний угол и пиксели прямой линии. В этом исследовании ТСМ и АРР трассировали наименьшее количество контурных пикселей, они не могли трассировать пиксели во внутренних углах. ППП также отслеживал меньше пикселей по сравнению с предложенным алгоритмом, поскольку не всегда верно определялись внутренние и внутренне-внешние углы.

Кроме того, МППП имеет неточности в определении внутренних углов, которые аналогичны несоответствиям ППП, и МППП отслеживает меньше пикселей по сравнению с предложенным алгоритмом. Предложенный алгоритм определил 99,4 % от общего числа пикселей контура и имеет максимальное общее количество трассируемых пикселей контура. Предложенный алгоритм дал наилучшие результаты в отношении точности трассировки.

Пример изображения, на котором проводилось определение точности работы предложенного алгоритма, приведен на рисунке 5.

Приведенный алгоритм предлагается применять для обнаружения контуров при быстродействующей обработке символической информации в условиях малого размера символа. Методы улучшения выделенной области изображения, предваряющие трассировку приведены в работе [7].

Таблица 1 – Сравнение качества обнаружения пикселей контуров различными алгоритмами

Номер тестового изображения	Общее количество, шт	Процент обнаруженных пикселей контура, %				
		ТСМ	APP	ПГП	МПГП	Предложенный алгоритм
1	8122	80,7	80,7	90,7	90,8	100
2	4092	76,4	76,4	88,5	88,5	100
3	13245	82,9	82,9	91,9	91,5	100
4	29281	80,9	80,9	90,7	90,7	100
5	16837	80,9	80,9	90,5	90,5	100
6	8797	83,4	83,4	92,5	92,5	97,9
7	17271	84,1	84,1	93,1	93,1	99,9
8	15703	78,6	78,6	89,5	89,5	98,5
9	48618	79,7	79,7	92,1	92,1	98,3
Итого	161966	80,8	80,8	91,1	91,0	99,4

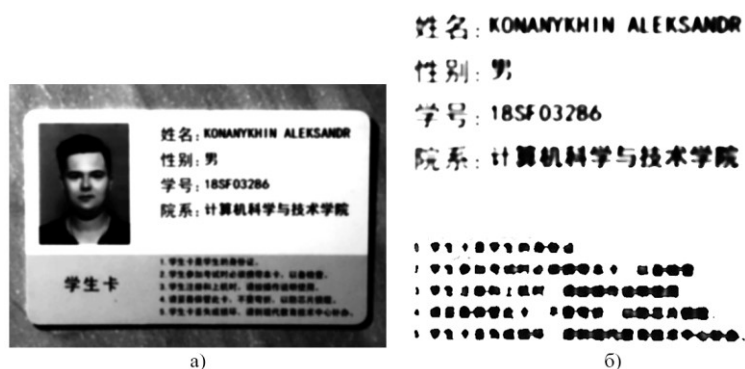


Рисунок 5 – Пример анализируемого изображения: а) изображение до предварительной обработки; б) исследуемое изображение после предварительной обработки, на котором проводилась проверка качества работы предложенного алгоритма

Результаты нахождения контурных пикселей на приведенном изображении показаны в таблице, изображению был присвоен номер 9. Для данного изображения процент обнаруженных контурных пикселей самый низкий ввиду достаточно большого зашумления изображения, нахождению на изображении большего количества пикселей внутренне-внешнего угла по сравнению с другими анализируемыми изображениями, так как на данном изображении присутствуют иероглифы.

Примеры пикселей, которые не удалось отследить предложенным алгоритмом, приведены на рисунке 6.

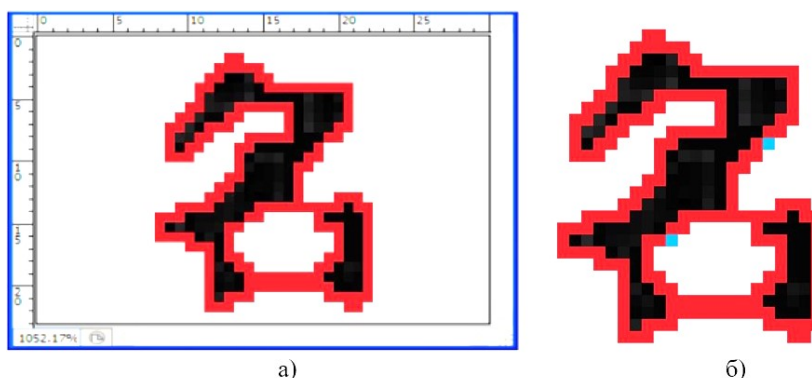


Рисунок 6 – Пример неотслеженных пикселей контура: а) контурные пиксели, обнаруженные предложенным алгоритмом (красным цветом показаны идентифицированные пиксели контура); б) синим цветом показан пиксель, который не удалось трассировать

Наилучшие результаты были получены на изображениях с разрешением 200 точек на дюйм (dpi) и выше, не содержащих иероглифы.

Наибольшее количество неточностей при трассировке предложенным алгоритмом возникает, если изображение напоминает шахматную доску, то есть имеются части изображения, представляющие собой единичные пиксели черного и белого цветов, расположенные в шахматном порядке, потому что такие изображения содержат большое количество внутренних и внешних углов. Такие ситуации при распознавании символов чаще возникают при малом размере символов, а также при обнаружении контуров у иероглифов.

Заключение. Вышеупомянутые традиционные способы отслеживания пикселей имеют определенные ограничения. Во-первых, некоторые алгоритмы, такие как ПГП и МПГП, выполняют ненужные операции перемещения над белыми пикселями, что увеличивает время обработки изображения и нахождения

контура. Во-вторых, не все алгоритмы могут определять контур в случае угловых пикселей; следовательно, они не могут дать описательную характеристику объекта и определить связь между объектами. Например, алгоритм МППП не всегда способен определить пиксель внутреннего-внешнего угла. Более того, МППП, как и ППП, также не может определить пиксели внешнего и внутреннего угла.

Приведенный алгоритм смог безошибочно идентифицировать пиксели внутреннего-внешнего угла, переднего-внутреннего угла и прямой линии, но не во всех случаях смог идентифицировать левый-внутренний угол и некоторые пиксели внешнего угла. Несмотря на это, предложенный алгоритм показал максимальную точность трассировки среди предложенных алгоритмов. Данный алгоритм идентифицирует также тип контурного пикселя, что в дальнейшем может использоваться для сжатия информации о хранимом контуре с возможностью последующего его восстановления по репрезентативным точкам.

Библиографический список

1. Jonghoon, Seo. Fast Contour-Tracing Algorithm Based on a Pixel-Following Method for Image Sensors / Jonghoon Seo, Seungho Chae, Jinwook Shim, Dongchul Kim, Cheolho Cheong, Tack-Don Han // *Sensors*. – 2016. – № 16 (3). – P. 353.
2. Соловьев, Ф. С. Распознавание образов и обнаружение контуров объекта на изображении / Ф. С. Соловьев, И. Е. Тарасов, А. Б. Петров // *Инновации в науке*. – 2019. – № 4 (92). – С. 4–9.
3. Reddy, P. R. Evaluation of stopping criterion in contour tracing algorithms / P. R. Reddy, V. Amarnadh, M. Bhaskar // *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.* – 2012. – № 3. – P. 3888–3894.
4. Konanykhin, A. Y. Algorithm for finding contours for the purpose of processing symbolic information in conditions of small symbol size and chromatic aberrations / A. Y. Konanykhin, T. N. Konanykhina // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – № 1843 (1). – P. 012018.
5. Бурмака, А. А. Системная модель распознавания и идентификации состояния предстательной железы по ее изображениям УЗИ и ТРУЗИ / А. А. Бурмака, Т. Н. Говорухина, К. В. Разумова // *Научные технологии*. – 2014. – Т. 15, № 12. – С. 13–20.
6. Konanykhin, A. Yu. Processing of MRI data for oncological diseases prediction / A. Yu. Konanykhin, T. N. Konanykhina // *Медико-экологические информационные технологии – 2021 : сборник научных статей по материалам XXIV Международной научно-технической конференции*. – Курск, 2021. – С. 76–83.
7. Конаныхин, А. Ю. Методы улучшения выделенной области изображения при быстросредействующей обработке символьной информации / А. Ю. Конаныхин, Т. Н. Конаныхина, В. С. Панищев // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 106–120.
8. Dolly, Indra. Feature Extraction of Bisindo Alphabets, Using Chain Code Contour / Dolly Indra, Sarifuddin Madenda, Eri Prasetyo Wibowo // *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*. – Vol. 9, № 4. – P. 3233–3242.
9. Галеев, Д. Т. Использование искусственных нейронных сетей для распознавания образов уличных сцен / Д. Т. Галеев, В. С. Панищев // *Информационные технологии и математическое моделирование систем 2020 : труды Международной научно-технической конференции*. – Одинцово, 2020. – С. 132–134.
10. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – Москва : Бином, 2006. – С. 762.
11. Потапов, А. Системы компьютерного зрения: современные задачи и методы / А. Потапов // *Control Engineering*. – 2014. – № 1. – С. 20–26.
12. Панищев, В. С. Распознавание символьной информации для автоматизации производственных процессов / В. С. Панищев, М. И. Труфанов, О. Г. Добросердов, О. О. Хомяков // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2021. – Т. 25, № 1. – С. 122–137.
13. Shelhamer, E. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation / E. Shelhamer, J. Long, T. Darrell // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2017. – P. 640–651.
14. Ляшева, С. А. Метод последовательного уточнения границ на изображениях дорожной обстановки / С. А. Ляшева, М. П. Шлеймович // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2020. – № 4. – С. 21–31.

References

1. Jonghoon, Seo, Seungho, Chae, Jinwook, Shim, Dongchul, Kim, Cheolho, Cheong, Tack-Don, Han. Fast Contour-Tracing Algorithm Based on a Pixel-Following Method for Image Sensors, *Sensors*, 2016, no. 16 (3), p. 353.
2. Soloviev, F. S., Tarasov, I. E., Petrov, A. B. Raspoznavanie obrazov i obnaruzhenie konturov obekta na izobrazhenii [Pattern Recognition and Detection of Object Contours in an Image]. *Innovatsii v nauke* [Innovations in Science], 2019, no. 4 (92), pp. 4–9.
3. Reddy, P. R., Amarnadh, V., Bhaskar, M. Evaluation of stopping criterion in contour tracing algorithms. *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, 2012, no. 3, pp. 3888–3894.
4. Konanykhin, A. Y., Konanykhina, T. N. Algorithm for finding contours for the purpose of processing symbolic information in conditions of small symbol size and chromatic aberrations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1843 (1), p. 012018.
5. Burmaka, A. A., Govorukhina, T. N., Razumova, K. V. Sistemnaya model raspoznavaniya i identifikatsii sostoyaniya predstatelnoy zhelezy po ee izobrazheniyam UZI i TRUZI [A systemic model for recognizing and identifying the state of the prostate gland based on its ultrasound and TRUS images]. *Naukoemkie tekhnologii* [High Technologies], 2014, no. 12 (15), pp. 13–20.
6. Konanykhin, A. Yu., Konanykhina, T. N. Processing of MRI data for oncological diseases prediction. *Mediko-ekologicheskie informatsionnye tekhnologii – 2021 : sbornik nauchnykh statey po materialam XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Medical and environmental information technologies – 2021 : a collection of scientific articles based on the materials of the XXIV International Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2021, pp. 76–83.
7. Konanykhin A. Yu., Konanykhina, T. N., Panishchev, V. S. Metody uluchsheniya vydelennoy oblasti izobrazheniya pri bystrodeystvuyushchey obrabotke simvolnoy informatsii [Methods for improving the selected area of the image during

high-speed processing of symbolic information]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* [Proceedings of the South-Western State University. Series: Management, Computer Engineering, Informatics. Medical instrumentation], 2021, no. 4 (11), pp. 106–120.

8. Dolly, Indra, Sarifuddin, Madenda, Eri, Prasetyo, Wibowo. Feature Extraction of Bisindo Alphabets, Using Chain Code Contour. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, vol. 9, no. 4, pp. 3233–3242.

9. Galeev, D. T., Panishchev, V. S. Ispolzovanie iskusstvennykh neyronnykh setey dlya raspoznavaniya obrazov ulichnykh stsen [Using artificial neural networks for pattern recognition of street scenes]. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie sistem 2020 : trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Information technologies and mathematical modeling of systems 2020 : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Odintsovo, 2020, pp. 132–134.

10. Shapiro, L., Stockman, J. *Kompyuternoe zrenie* [Computer vision]. Moscow, Binom Publ., 2006, p. 762.

11. Potapov, A. Sistemy kompyuternogo zreniya: sovremennyye zadachi i metody [Computer vision systems: modern problems and methods]. *Control Engineering*, 2014, no. 1, pp. 20–26.

12. Panishchev, V. S., Trufanov, M. I., Dobroserdov, O. G., Khomyakov, O. O. Raspoznavanie simvolnoy informatsii dlya avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov [Recognition of symbolic information for automation of production processes]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Southwestern State University], 2021, vol. 25, no. 1, pp. 122–137.

13. Shelhamer, E., Long, J., Darrell, T. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, pp. 640–651.

14. Lyasheva, S. A., Shlyemovich, M. P. Metod posledovatel'nogo utochneniya granits na izobrazheniyakh dorozhnoy obstanovki [Method of Sequential Refinement of Borders on Images of Road Conditions]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2020, no. 4, pp. 21–31.

УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

УДК 378.14: 004.891.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЕТЕНТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Статья поступила в редакцию 22.04.2022, в окончательном варианте – 30.04.2022.

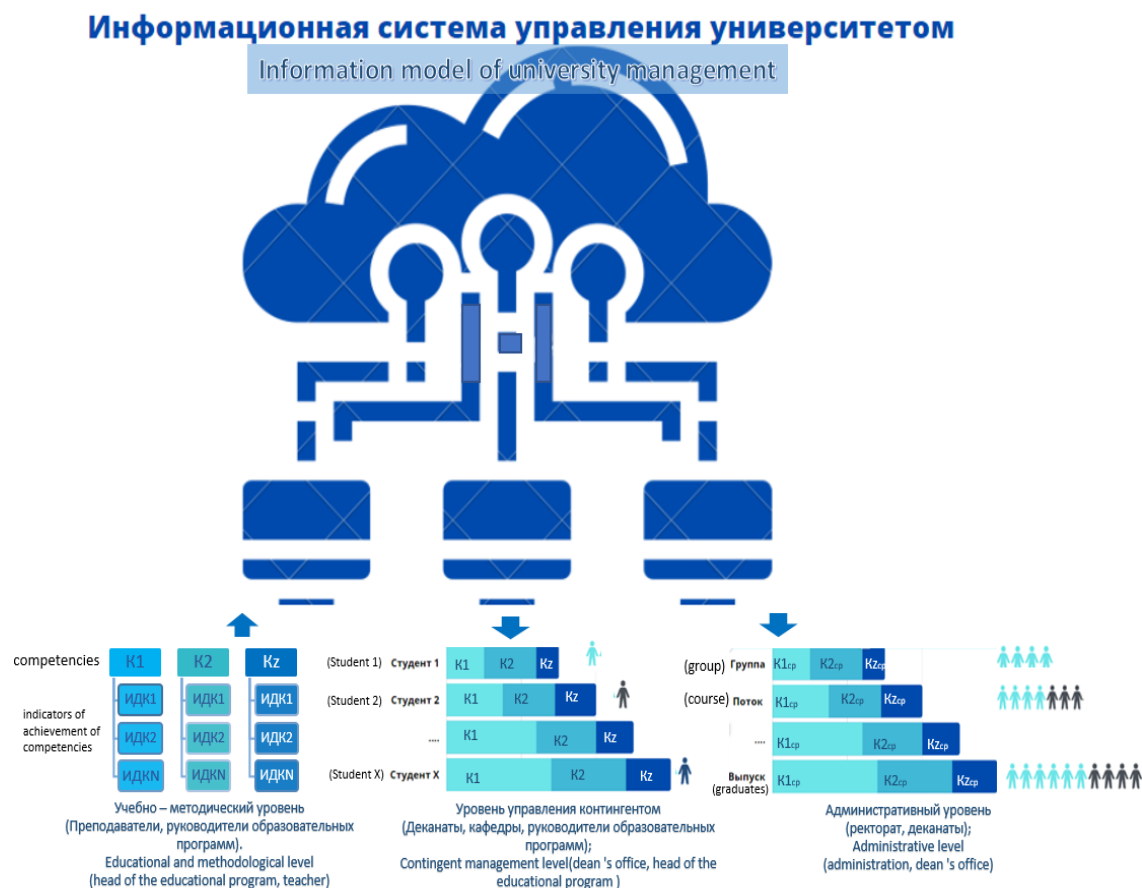
Кунц Екатерина Юрьевна, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 630102, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, начальник отдела дистанционного обучения, ORCID: 0000-0003-3903-4737, e-mail: kuntsey@sibgti.ru

Лоژников Павел Сергеевич, Омский государственный технический университет, 644050, Российская Федерация, Омск, пр. Мира, 11, доктор технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7878-1976, e-mail: lozhnikov@mail.ru

В данной работе представлена концепция единой информационной модели представления образовательных данных университета, которая будет способствовать формированию новых подходов к управлению на основе данных. В основе исследования авторы предлагают использовать в виде входящих данных измеряемые количественные и качественные показатели образовательного процесса на основе реализации компетентностной модели учетной информационной системы университета и оптимизационной модели построения набора индикаторов достижения компетенций. Такой способ изменения результатов обучения является уникальным и позволяет многие управленческие решения сделать более прозрачными и своевременными, а также поддерживать в актуальном состоянии портфолио студентов и выпускников университета.

Ключевые слова: информационная система управления университетом, компетенция, индикаторы достижения компетенций, компетентностная модель, модель построения индикаторов достижения компетенций, управляющие решения, уровень принятия решений, электронная информационная образовательная среда, подсистема управления обучением, учетная система, результаты обучения

Графическая аннотация (Graphical annotation)



USING THE COMPETENCE MODEL OF AN EDUCATIONAL PROGRAM FOR MAKING MANAGERIAL DECISIONS IN AN EDUCATIONAL ORGANIZATION

The article was received by the editorial board on 22.04.2022, in the final version – 30.04.2022.

Kunts Ekaterina Yu., Siberian State University of Telecommunications and Information Science, 86 Kirov St., Novosibirsk, 630102, Russian Federation,

Head of Distance Learning Department, ORCID: 0000-0003-3903-4737, e-mail: kuntsey@sibguti.ru

Lozhnikov Pavel S., Omsk State Technical University, 11 Mira Ave., Omsk, 644050, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-7878-1976, e-mail: lozhnikov@mail.ru

This paper presents the concept of a unified information model for the presentation of educational data of the university, which will contribute to the formation of new approaches to data-based management. At the heart of the study, the authors propose to use measurable quantitative and qualitative indicators of the educational process in the form of incoming data based on the implementation of the competence model of the university's accounting information system and an optimization model for building a set of indicators of competence achievement. This method of changing learning outcomes is unique and allows many management decisions to be made more transparent and timelier, as well as to obtain a graduate portfolio for a potential employer.

Keywords: university management information system, competence, indicators of competence achievement, competence model, model of building indicators of competence achievement, management decisions, decision-making level, electronic information educational system, learning management subsystem, accounting system, learning outcomes

Введение. В настоящее время принятие управленческих решений в университетах становится возможным без опоры на агрегированные данные, собираемые из ключевых учетных информационных систем вуза. Каким бы ни был уровень автоматизации университета, его базовые процессы взаимодействия «преподаватель – студент», по требованиям федеральных государственных образовательных стандартов, должны происходить в электронной информационно-образовательной среде (ЭИОС). Поэтому в каждом вузе сегодня как минимум есть две подсистемы в составе ЭИОС:

1. Подсистема управления обучением (LMS) – программная среда для администрирования учебных курсов в рамках образовательного процесса.

2. Подсистема фиксации результатов промежуточной аттестации и результатов освоения основной образовательной программы (Учетная система).

В данной работе не важно, в каких программных продуктах реализуются вышеперечисленные подсистемы. Главное требование к реализации предлагаемого подхода к управлению на основе данных – это поддержка единой информационной модели представления образовательных данных университета.

Одна из главных управленческих задач в государственных университетах на сегодняшний день – управление нормой выпуска специалистов. Особенно остро эта задача стоит по направлениям подготовки ИТ-специалистов. В рамках федерального проекта «Кадры для цифровой экономики» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» к 2024 году ежегодно в России должно поступать на обучение по программам высшего образования в сфере информационных технологий 120 тыс. абитуриентов. Университетам в последние годы не отказывают в увеличении контрольных цифр приема (КЦП) по ИТ-направлениям. При этом зачастую падает качество подготовки выпускников и оставляет желать лучшего сохранность контингента. Причин этому множество. В данной работе предлагается подход для динамической оценки качества подготовки ИТ-специалистов в университетах с возможностью принятия корректирующих управленческих решений на разных уровнях.

Постановка задачи исследования. В качестве исходных данных, которые поступают в систему для принятия управленческих решений, используются универсальные признаки, которые формируются в ЭИОС. Данные признаки условно делятся на две большие группы: количественные и качественные.

К количественным относятся традиционные измеряемые показатели, связанные с движением контингента студентов в вузе (зачисленные, отчисленные, находящиеся в академическом отпуске). С точки зрения управления, можно было бы оперировать только количественными признаками. Модели такого типа очень широко применяются в системных исследованиях и отражают взаимосвязь трех компонентов: «входа», «процесса преобразования» и «выхода». При этом под «выходом» понимают то, что передается из системы во внешнюю среду или вновь поступает на «вход» образовательного учреждения и является итоговым результатом процессов преобразований [11, с. 28]. Таким образом, важными количественными показателями будут являться еще КЦП и количество выпускников как основной и конечный результат деятельности образовательной организации. Следует отметить, что второй показатель по своему содержанию есть не что иное, как выполненное государственное задание физических и (или) юридических лиц по подготовке специалистов, и в нашем случае определяет степень укомплектованности предприятий ИТ-специалистами.

С количественными признаками, как правило, не возникает проблем с точки зрения их фиксации в ходе образовательного процесса, но следует понимать, что данная группа признаков ограничена уровнем статистической обработки внесенных оператором оценочных данных и формирования отчетов. На сегодняшний день большинство вузов научились оперировать этой группой признаков, и на их основе руководители разных уровней в университетах принимают управленческие решения. При этом вопросы измерения

качества образовательной деятельности уходят на второй план. Этому способствует ряд обстоятельств. Во-первых, количество различных конкурсов, отчетов, мониторингов, в которых участвуют университеты, ежегодно возрастает. При этом оценивать вузы по однозначно измеряемым признакам стало быстро и удобно. Во-вторых, однозначных универсальных методик по измерению качества образовательной деятельности, которые можно было бы внедрить в большинство университетов, пока нет. Поэтому возникают вопросы к объективности качественных показателей, которые университеты предоставляют в различных отчетах о результатах своей деятельности. Как следствие, мы наблюдаем снижение качества образовательной деятельности вузов из-за того, что они фокусируются на количественных показателях.

В данном исследовании предлагается использовать измеряемые качественные признаки, которые можно фиксировать в ходе освоения основной образовательной программы. К таким признакам делается попытка отнести уровень сформированности каждой из компетенций образовательной программы, по которой обучается студент. Этому способствуют разработанные в конце 2021 г. программы цифровой трансформации в университетах. Мероприятия этих программ направлены в том числе на модернизацию ЭИОС, информационных систем в вузах, что приближает реализацию построения компетентностной модели образовательной программы в режиме реального времени. Требования построения модели исходят из логики стандартов и дополнений к ним согласно современным тенденциям. Измеримость, учет и оценка компетенций, во-первых, способствует эффективной и своевременной корректировке траектории обучения будущих ИТ-специалистов, а во-вторых, повышению уровня качества образовательной и управленческой деятельности в вузах.

В учетных системах университетов сохраняются оценки по дисциплинам, которые принимают значения: «2 – неудовлетворительно», «3 – удовлетворительно», «4 – хорошо», «5 – отлично». Конечно, они также относятся к качественным признакам, но в них, безусловно, есть доля субъективности. Оценки по дисциплинам выставляются чаще всего преподавателями, которые сами же преподают данную дисциплину. В учетных системах не учитывается вес оценки по той или иной дисциплине. Например, «5» по дисциплине преподавателя, у которого средняя оценка для всех студентов потока 3,6, будет иметь более высокий вес, чем у того, где средняя 4,9. Аналогичная картина может складываться и по результатам ЕГЭ. Наблюдается, что ежегодно средний балл ЕГЭ по предметам может колебаться в зависимости от сложности заданий. Таким образом, качественные признаки из-за своей неполноты представления (фиксации) в учетных системах университетов превращаются в количественные.

Цифровая трансформация стимулирует образовательный процесс к вызовам внешних изменений путем применения адаптивных систем и создание условий для реализации построения актуальной в режиме реального времени компетентностной модели образовательной программы. Требования построения модели исходят из логики стандартов и дополнения к ним согласно современным тенденциям. Измеримость, учет и оценка компетенций должны способствовать эффективности траектории развития кадров, постижение актуального набора компетенций должно способствовать повышению в должности, в том числе управленческой деятельности.

В настоящей работе предлагается универсальный метод оценивания результатов обучения в компетентностной модели.

Проблемой оценивания результатов обучения в последние годы активно занимаются исследователи как в России (А.В. Хуторской, О.Е. Пермяков, С.В. Минькова, В.П. Беспалько, И.Д. Рудинский и др.), так и за рубежом (W. Huttmacher, J. Wilkerson и др.). Ни у кого из них нет сомнений в возможности измерения результатов обучения через сформированность компетенций. Однако если при проектировании основной образовательной программы влияние субъективности не является очевидным, то при оценивании ее освоения фактор субъективизма становится критическим, так как результат оценивания непосредственно наблюдаем и используется, зачастую в неизменном виде, в задачах управления развитием образовательных и трудовых ресурсов. К тому же в задаче оценивания имеет место множественная нечеткость, обусловленная влиянием человеческого фактора как на процедуру, так и на результат оценивания. Поэтому решение задачи оценивания результатов обучения с необходимостью влечет разработку методик и информационных технологий на основе методов и алгоритмов искусственного интеллекта, позволяющих эффективно обработать и учесть указанную нечеткость. Создание такого комплекса может выступить хорошей основой для построения методики управления образовательным процессом в высших учебных заведениях по заданному конечному результату.

Компетентностный подход. Построение и реализация компетентностной модели в учетной информационной системе университета – на сегодняшний день актуальная задача для вузов. Предлагается использовать оптимизацию компьютерной модели с помощью аппарата генетических алгоритмов в несколько стадий на уровнях состава и структуры отдельных компетенций [13]. На основе этой модели был предложен оригинальный подход к построению дескрипторной модели компетенции [6]. При этом компетенция рассматривается как структура элементарных результатов обучения типа знаний, умений и навыков (ЗУН), на которой определены индикаторы достижения компетенции (ИДК). Дескрипторы индикаторов определяются на описательном и структурном уровнях как композиция «Активность» – «Объект контроля» – «Эпитеты». Исходные данные для оценивания формируются на основе

экспертных суждений преподавателей, ответственных за контрольное испытание. В числе прочего указывается, что для каждой компетенции, состав которой, согласно федеральному государственному образовательному стандарту, формируется образовательной организацией, выполняется агрегирование множества её составляющих ЗУН в ИДК горизонтальным либо вертикальным способом. Построенная модель позволяет в автоматизированном режиме осуществить разработку оценочных средств определения выраженности индикаторов достижения компетенций, а также реализовать процедуру оценивания этой выраженности за счет применения аппарата нечеткой логики [9]. В модели используются классические механизмы нечеткой логики, исторически получившие наиболее широкое применение в системах нечеткого вывода и апробированные на задачах нечеткого управления в разных областях. Таким образом, для фиксации качественных показателей образовательной деятельности предлагается оптимизационная модель построения ИДК как третья, завершающая стадия оптимизации компетентностной модели (первые две стадии оптимизации которой рассмотрены в [3]).

Техника построения ИДК подробно представлена в [6]. Модель компетенции представляется в виде совокупности двухвершинных ориентированных графов $g((\Theta_k, \Theta_l), \Sigma_{kl}) \in G$, где $\Theta_k, \Theta_l \in \Theta$ – пара связанных ЗУН ($k \neq l$) из общего множества ЗУН компетенции, $\Sigma_{kl} \in \Sigma$ – ориентированная связь от Θ_k к Θ_l . Тогда рабочая структура i -й компетенции:

$$M_i = \{g_\alpha((\Theta_i\alpha_k, \Theta_i\alpha_l), \Sigma_i\alpha_{kl}), g_\beta((\Theta_i\beta_k, \Theta_i\alpha_l), \Sigma_i\beta\alpha_{kl}), g_\gamma((\Theta_i\gamma_m, \Theta_i\alpha_l), \Sigma_i\gamma\alpha_{ml}), \Sigma_{ji}\alpha\beta, \Sigma_{ij}\alpha\beta\},$$

$$g_\alpha, g_\beta, g_\gamma \in G_i, \{g_\alpha\} \cap \{g_\beta\} \cap \{g_\gamma\} = \emptyset.$$
(1)

Здесь, по аналогии с базовой моделью (1): M_i – структурная модель i -й компетенции; $\Theta_i\beta_k, \Theta_i\alpha_l$ и $\Theta_i\gamma_m$ – соответственно базовый, образующий и дополнительный ЗУН; $\Sigma_i\alpha_{kl}$ – ориентированная связь от $\Theta_i\beta_k$ к $\Theta_i\alpha_l$; $\Sigma_i\beta\alpha_{kl}$ и $\Sigma_i\gamma\alpha_{ml}$ – ориентированная связь соответственно от $\Theta_i\beta_k$ и от $\Theta_i\gamma_m$ к $\Theta_i\alpha_l$ (обратная связь запрещена); g_α – двувершинные графы, представляющие ядерные связи; g_β и g_γ – двувершинные графы, связывающие периферийные компоненты с ядром; $\Sigma_{ji}\alpha\beta$ – входящая внешняя связь, привносящая в структуру i -й компетенции базовый ЗУН как копию образующего ЗУН j -й компетенции, $\Sigma_{ij}\alpha\beta$ – исходящая внешняя связь, транслирующая образующий ЗУН из ядра i -й компетенции в структуру j -й компетенции в качестве базового ЗУН. Дополнительные ЗУН $\Theta_i\gamma$ обеспечивают освоение образующих и в односторонних связях с ними составляют основу компетенции, а входящие в нее ЗУН называются основными. В [2] доказано, что такой системный подход позволяет адекватно оценивать сформированность компетенций обучающихся.

Оптимизационная модель построения набора ИДК. Данная модель также строится в соответствии с моделью (1). В основу ИДК ложится произвольный j -й базис $V_{ij} \in B_i$ i -й компетенции как связанная подструктура ЗУН, определенная на модели (1) и выражающая субспособность как агрегатную часть компетенции. Минимальное число ИДК определяется мощностью множества учебных дисциплин, формирующих i -ю компетенцию: $N_{I_{\min}} = |\Pi_i|$. Максимальное число ИДК определяется максимальным числом базисов компетенции: $N_{I_{\max}} = |B_i|$. Также выдвигается требование покрытия всеми ИДК основы i -й компетенции: $\bigcup_{k=1}^{N_I} \Theta_{ik}^I = \Theta_i\alpha \cup \Theta_i\gamma$.

В основу модели положен классический генетический алгоритм со структурой, подобной модели в статье [6], с бинарным матричным кодированием хромосомы. Хромосома кодирует набор ИДК i -й компетенции. Число столбцов $m = |\Theta_i|$, число строк $n \in [N_{I_{\min}}, N_{I_{\max}}]$. Ген с координатами (k, j) единичным значением задает наличие j -го ЗУН ($j = \overline{1, m}$) в структуре k -го ИДК ($k = \overline{1, n}$).

В качестве исходных данных принимаются трудовые функции, выбранные из справочника сообразно запросам рынка труда, а также характеристики учебных дисциплин, определяемые наборами ЗУН и ключевых слов. Вводятся параметры и ограничения генетических операторов. Определяются ограничения на моделирование состава и структуры каждой компетенции и компетентностной модели в целом. В результате на выходе образуется компетентностная модель, структурированная оптимальным образом наборами индикаторов достижения компетенций. Программная реализация данной модели официально зарегистрирована [8, 10]. Оптимизационная модель построения набора достижения компетенций описана в [1].

Реализации построения компетентностной модели в ЭИОС. Реализация построения компетентностной модели обучающегося в ЭИОС позволит накапливать достаточно большие объемы данных о динамике обучения студентов, что в дальнейшем будет способствовать реализации методов и алгоритмов для интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в университете. В дальнейшем предлагается выделить три уровня управления для принятия решений:

- 1) административный (ректорат, деканаты);
- 2) управления контингентом (деканаты, кафедры, руководители образовательных программ);
- 3) учебно-методический (преподаватели, руководители образовательных программ).

При таком подходе каждый из перечисленных выше уровней представляет собой подсистему управления в иерархии всей системы управления вузом. При этом учтено, что количественные и качественные признаки более высокого уровня слагаются из количественных и качественных признаков входящих в нее подсистем управления более низких уровней.

Идея использования компетентностной модели образовательной программы для принятия управленческих решений в университетах заключается в том, что на каждом уровне нужно оперировать разными группировками признаков. В настоящей работе предлагается использовать признаки, которые определяют уровень сформированности набора компетенций образовательной программы для каждого студента. Данные признаки имеют одну и ту же природу, но на каждом уровне могут масштабироваться, по аналогии с количественными показателями в учетной системе университета (табл.).

Таблица – Масштабирование и периодичность фиксации количественных показателей в зависимости от уровня принятия решения

Количественные показатели	Диапазон масштабирования	Уровни принятия решений	Периодичность фиксации показателя
Общее количество обучающихся	вуз	Административный	по запросу
	направление	Управления контингентом	по запросу
	профиль (группа)	Учебно-методический	по запросу
Набор студентов	вуз	Административный	1 раз в год
	направление	Управления контингентом	1 раз в год
	профиль (группа)	Учебно-методический	1 раз в год
Количество студентов по курсам	вуз	Административный	по запросу
	направление	Управления контингентом	по запросу
	профиль	Учебно-методический	по запросу
Перевод с курса на курс (количество переведенных студентов)	вуз	Административный	2 раза в год
	направление	Управления контингентом	2 раза в год
	профиль (группа)	Учебно-методический	2 раза в год
Количество отчисленных студентов по инициативе образовательной организации (неуспеваемость)	вуз	Административный	2 раза в год
	направление	Управления контингентом	2 раза в год
	профиль (группа)	Учебно-методический	2 раза в год
Количество отчисленных студентов по собственному желанию	вуз	Административный	по запросу
	направление	Управления контингентом	по запросу
	профиль (группа)	Учебно-методический	по запросу
Общее количество преподавателей	вуз	Административный	1 раз в год
	направление	Управления контингентом	1 раз в год
	профиль	Учебно-методический	1 раз в год
Общее количество преподавателей	вуз	Административный	1 раз в год
	направление	Управления контингентом	1 раз в год
	профиль	Учебно-методический	1 раз в год
Общее количество преподавателей штатных	вуз	Административный	1 раз в год
	направление	Управления контингентом	1 раз в год
	профиль (группа)	Учебно-методический	1 раз в год
Общее количество преподавателей внешних совместителей	вуз	Административный	1 раз в год
	направление	Управления контингентом	1 раз в год
	профиль (группа)	Учебно-методический	1 раз в год
Количество выпускников	вуз	Административный	по запросу
	направление	Управления контингентом	по запросу
	профиль (группа)	Учебно-методический	по запросу
Количество образовательных программ, по которым осуществляет свою деятельность образовательная организация	вуз	Административный	1 раз в год
	институт (деканат)	Управления контингентом	1 раз в год
	кафедра	Учебно-методический	1 раз в год

Для фиксации качественных показателей необходимо, чтобы на нижнем учебно-методическом уровне, который опирается на подсистему LMS, происходила оценка знаний конкретного студента (рис.). Здесь управленческие решения принимают руководители образовательных программ и преподаватели. Далее на уровне управления контингентом результаты студентов уже усредняются в группы. На этом уровне управленческие решения принимают деканы, заведующие кафедрами, реже – руководители образовательных программ. На административном уровне, как правило, настраиваются различные отчеты, фильтры, необходимые для поддержки принятия тактических и стратегических управленческих решений администрации университета.

В ЭИОС большинства университетов пока не реализована интеграция LMS, где происходит настройка учебных курсов в рамках образовательного процесса, с учетными системами. Но в ближайшей перспективе ведущие университеты России с разной степенью проникновения выполняют эту интеграцию, реализуя свои программы цифровой трансформации. В идеальном случае, цифровые фонды оценочных средств, электронные лабораторные практикумы, тренажеры и т.п. должны производить оценку достижения соответствующих ИДК через дескрипторы, а они, в свою очередь, – сформировывать компетенции. Возможно также задавать вес V_i для каждого ИДК_и соответствующей компетенции. Если количество ИДК в компетенции равно N , то по умолчанию вес может быть рассчитан как $V_i = 1/N$. Но методисты могут и самостоятельно задавать этот параметр, если считают, что ИДК неравнозначны.

В представленном исследовании предлагается использовать следующую шкалу для достижения каждого ИДК: «0 – не сформирован», «0,5 – низкий», «0,75 – средний», «1 – высокий». Можно также измерять ИДК в интервальных оценках, в зависимости от программной реализации этих механизмов в LMS. Таким образом, компетенция будет считаться сформированной, когда все включенные в нее индикаторы будут достигнуты на определенном этапе обучения. В данной шкале измерений максимальное значение, свидетельствующее о сформированности компетенции, равно 1.

На рисунке, в нижней его части, представлена схема «включения» индикаторов для набора из Z компетенций соответствующей образовательной программы.

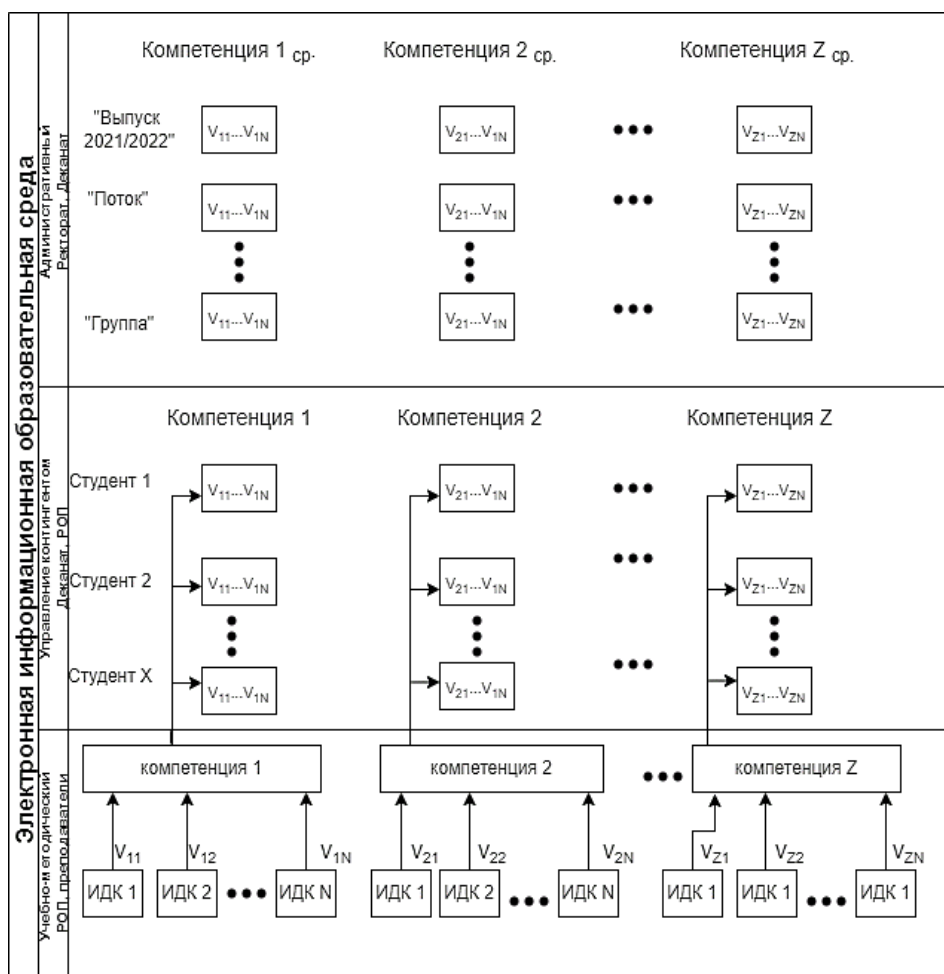


Рисунок 1 – Схема реализации построения компетентностной модели обучающегося в ЭИОС

Преимущества поддержки компетентностной модели в учетной системе университета в отличие от хранения оценок по дисциплинам образовательной программы заключаются в следующем:

1. Компетенция может формироваться несколькими дисциплинами через оценочные средства разных преподавателей.

2. Компетенции лучше раскрывают определенные способности и личные качества студентов, которые как раз больше интересуют работодателей. Можно отслеживать динамику формирования определенной компетенции у студентов в течение всего периода обучения в университете.

3. Набор компетенций может быть расширен. В данную модель легко может быть встроен механизм учета достижений студентов на факультативных занятиях, а также внеучебных мероприятиях. Каждая активность (мероприятие) может быть представлена в пространстве соответствующих ИДК.

Выводы. Концепция управления в вузе, описанная авторами в данной статье, представляет систему управления, понимания и поведения составляющих частей организации на всех уровнях иерархии системы управления. Такой подход управления по результатам сосредоточен на состоянии реального процесса управления, мотивации и квалификации руководителей, сотрудников и студентов. Особое внимание уделяется внешним и внутренним ситуационным факторам. Полученные при этом сведения служат основой определения желаемых результатов для разных уровней управления.

Внедрение и поддержка жизненного цикла набора компетенций студентов в ЭИОС университета позволяет многие управленческие решения сделать более прозрачными и своевременными. Высокие темпы развития ИТ-отрасли делают ее чувствительной к высокой квалификации специалистов. Основным источником пополнения ИТ-специалистов являются образовательные организации, которые в силу своей инертности на фоне динамического развития ИТ-отрасли просто не успевают подготовить ИТ-специалистов с таким набором и уровнем сформированных компетенций, которые необходимы для современного работодателя. На этом фоне предложенный подход позволяет использовать в оперативном управлении оценку качества подготовки ИТ-специалистов в университетах. У ответственных лиц за подготовку студентов по ИТ-направлениям от преподавателей до ректора появляется инструментарий для контроля и корректировки образовательных траекторий как отдельных студентов, так и целых групп (потоков).

Сегодня возникают сложности с привлечением и удержанием преподавателей по ИТ-дисциплинам в университетах. ИТ-специалисты не заинтересованы преподавать в вузах, так как на рынке труда ИТ-индустрия предлагает самые высокооплачиваемые рабочие места. Зачастую случаются «провалы» в подготовке целых студенческих групп по ключевым дисциплинам, из-за чего востребованные компетенции могут оказаться несформированными. Вовремя выявляя эти пробелы, например, руководитель образовательной программы может рекомендовать в таких случаях прохождение онлайн-курсов как преподавателям, так и студентам, чтобы повысить уровень сформированности соответствующих компетенций у обучающихся.

Таким образом, университеты получают реальную возможность контролировать количество и качество подготовки ИТ-специалистов, предоставлять работодателям объективное портфолио студентов и выпускников в части наборов сформированных компетенций за весь период обучения.

Библиографический список

1. Kunts, E. Multiparameter Optimization Model for Designing Competence Achievement Indicators / E. Kunts // 17th International Asian School-Seminar". – 2021. – P. 49–54.
2. Il'ina, T. Neoclassical Approach to Objectivization of Competency Assessment / T. Il'ina, V. Kanev, A. Polietaikin // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, SIBIRCON. – 2017. – P. 72–76.
3. Вольпян, Н. Модели компетенций. Международный опыт в ИТ-сфере // Рождение разума. – Москва : ЛЕНАНД, 2013.
4. Ильин, Д. Ю. Информационно-аналитический сервис формирования актуальных профессиональных компетенций на основе патентного анализа технологий и выделения профессиональных навыков в вакансиях работодателей / Д. Ю. Ильин, Е. В. Никульев, Г. Г. Бубнов, Е. О. Матешук // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 2 (38). – С. 71–88.
5. Казакова, Е. И. Оценка универсальных компетенций студентов при освоении образовательных программ / Е. И. Казакова, И. Ю. Тарханова // Ярославский педагогический вестник. – 2018. – № 5. – С. 127–135.
6. Кулешова, Н. В. Методика разработки индикаторов достижения профессиональных компетенций и построения дескрипторной модели компетенций / Н. В. Кулешова, А. Н. Полетайкин // Качество высшего и среднего профессионального образования в условиях перехода на ФГОС нового поколения : материалы LX науч.-метод. конф. – Новосибирск : СибГУТИ, 2019. – С. 112–118.
7. Новиков, Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – 3-е изд. – Москва : Физматлит, 2012. – 604 с.
8. Патент на промышленный образец RU 120352. Схема организации цифрового фонда оценочных средств основной профессиональной образовательной программы / А. Н. Полетайкин, Н. В. Кулешова, Е. Ю. Кунц, В. В. Подколзин ; заяв. и правообл. ФГБОУ ВО «Кубанский гос. ун-т». – 2020. – Бюл. № 7.
9. Полетайкин, А. Н. Нечеткая дескрипторная модель оценивания выраженности индикаторов достижения компетенций / А. Н. Полетайкин, В. В. Подколзин, Н. В. Кулешова, Е. Ю. Кунц // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – № 3 (47). – С. 55–69. – DOI: 10.21672/2074-1707.2019.47.3.055-069.
10. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019664222 РФ. Программа для построения оптимального набора индикаторов достижения компетенции / А. Н. Полетайкин, Е. Ю. Кунц ; заяв. и правообл. ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет». – Бюл. № 11 ; зарегистр. 01.11.2019.

11. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 № 273-ФЗ. – Режим доступа: <https://nekrasovspb.ru/doc/zakonobobrazovani.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 15.03.2022).

12. Цифровая экономика РФ : официальный сайт Министерства цифрового развития и массовых коммуникаций России. – Режим доступа: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 04.04.2022).

13. Шевцова, Ю. В. Многоуровневая взвешенная оптимизация компетентностной модели профессиональной образовательной программы высшего образования / Ю. В. Шевцова, А. Н. Полетайкин, Л. Ф. Данилова // Информатизация образования и науки. – 2018. – № 4 (40). – С. 140–161.

References

1. Kunts, E. Multiparameter Optimization Model for Designing Competence Achievement Indicators. *17th International Asian School-Seminar*, 2021. P. 49–54.

2. Il'ina, T., Kanev, V., Polietaikin, A. Neoclassical Approach to Objectification of Competence Assessment. *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, SIBIRCON*, 2017, pp. 72–76.

3. Volpryan N. Modeli kompetentsiy. Mezhdunarodnyy opyt v IT-sfere [Models of competencies. International experience in the IT sphere]. *Rozhdeniye razuma* [The Birth of reason]. Moscow, LENAND Publ., 2013.

4. Ilin, D. Yu., Nikulchev, E. V., Bubnov, G. G., Mateshuk, E. O. Informatsionno-analiticheskiy servis formirovaniya aktualnykh professionalnykh kompetentsiy na osnove patentnogo analiza tekhnologiy i vydeleniya professionalnykh navykov v vakansiyakh rabotodateley [Information and analytical service for the formation of relevant professional competencies based on patent analysis of technologies and the allocation of professional skills in employers' vacancies]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 2 (38), pp. 71–88.

5. Kazakova, E. I., Tarkhanova, I. Yu. Otsenka universalnykh kompetentsiy studentov pri osvoyenii obrazovatelnykh program [Assessment of students' universal competencies in mastering educational programs]. *Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik* [Yaroslavl Pedagogical Bulletin], 2018, no. 5, pp. 127–135.

6. Kuleshova, N. V., Poletaykin, A. N. Metodika razrabotki indikatorov dostizheniya professionalnykh kompetentsiy i postroyeniya deskriptornoy modeli kompetentsiy [Methodology for the development of indicators for the achievement of professional competencies and the construction of a descriptor model of competencies]. *Kachestvo vysshego i srednego professionalnogo obrazovaniya v usloviyakh perekhoda na FGOS novogo pokoleniya : materialy LX nauchno-metododicheskoy konferentsii* [Quality of higher and secondary vocational education in the transition to a new generation of FGOS : proceedings of the LX Scientific Methodical Conference]. Novosibirsk, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, 2019, pp. 112–118.

7. Novikov, D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational problems]. 3rd ed. Moscow, Fizmatlit, 2012. 604 p.

8. Poletaykin, A. N., Kuleshova, N. V., Kunts, E. Yu., Podkolzin, V. V. *Patent na promyshlenny obrazets RU 120352. Skhema organizatsii tsifrovogo fonda otsenochnykh sredstv osnovnoy professionalnoy obrazovatelnoy programmy* [Industrial design patent RU 120352. Scheme of organization of the digital fund of evaluation funds of the main professional educational program] ; application and the copyright holder of the Kuban State University, 2020, bull. no. 7.

9. Poletaykin A. N., Podkolzin, V. V., Kuleshova, N. V., Kunts, E. Yu. Nechetkaya deskriptornaya model otsenivaniya vyrazhennosti indikatorov dostizheniya kompetentsiy [Fuzzy descriptor model for assessing the severity of indicators of competence achievement]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2019, no. 3 (47), pp. 55–69. DOI: 10.21672/2074-1707.2019.47.3.055-069.

10. Poletaykin, A. N., Kunts, E. Yu. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM 2019664222 RF. Programma dlya postroyeniya optimalnogo nabora indikatorov dostizheniya kompetentsii* [Certificate of the state registration of the computer program 2019664222 of the Russian Federation. A program for constructing an optimal set of indicators for achieving competence] ; application and the copyright of the Kuban State University, bull. no. 11 ; regist. 01.11.2019.

11. *Federal Law "On Education in the Russian Federation" dated 29.12.2012 no. 273-FZ*. Available at: <https://nekrasovspb.ru/doc/zakonobobrazovani.pdf> (accessed 15.03.2022).

12. *Tsifrovaya ekonomika RF : ofitsialnyy sayt Ministerstva tsifrovogo razvitiya i massovykh kommunikatsiy Rossii* [Digital Economy of the Russian Federation : official website of the Ministry of Digital Development and Mass Communications of Russia]. Available at: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/> (accessed 04.04.2022).

13. Shevtsova, Yu. V., Poletaykin, A. N., Danilova, L. F. *Mnogourovnevaya vzveshennaya optimizatsiya kompetentnostnoy modeli professionalnoy obrazovatelnoy programmy vysshego obrazovaniya* [Multilevel weighted optimization of the competence model of the professional educational program of higher education]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of Education and Science], 2018, no. 4 (40), pp. 140–161.

УДК 004.89

**ВИРТУАЛЬНЫЙ АССИСТЕНТ ВОДИТЕЛЯ
ДЛЯ ПОИСКА МЕСТА НА ОТКРЫТОЙ ПАРКОВКЕ**

Статья поступила в редакцию 12.04.2022, в окончательном варианте – 26.04.2022.

Кравец Алла Григорьевна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. В.И. Ленина, 28; Государственный университет «Дубна», 141982, Российская Федерация, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-1675-8652, e-mail: agk@gde.ru

Астанков Алексей Александрович, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. В.И. Ленина, 28,

магистрант, ORCID: 0000-0001-9236-2292, e-mail: lehaastankov5@mail.ru

Мокрушин Георгий Александрович, Государственный университет «Дубна», 141982, Российская Федерация, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19,

магистрант, ORCID: 0000-0001-8098-3550, e-mail: geordanomokrushino@gmail.com

В статье рассматривается разработка виртуального ассистента для поиска места на открытой парковке. Чаще всего, приезжая в торговые центры и магазины, водитель не может найти место на открытых парковках, и ему приходится искать его продолжительное время. Это влечет увеличение загрязнения окружающей среды и рост количества ДТП. Либо водителям приходится ставить свое авто в неполюженном месте (проезжая часть, тротуар), что приводит к неполному использованию проезжей части и дискомфорту прохожих. Предлагаемый подход помогает решать эту проблему за счет быстрой навигации до свободного парковочного места на близлежащих открытых парковках. В ходе исследования были проанализированы современные подходы, аналоги систем. Был реализован ассистент, позволяющий упростить процесс паркинга. Для тестирования ассистента использовались изображения с камер потокового видео. Был описан процесс проектирования ассистента, его функции и возможности. Сервер ассистента выполняет функции хранения разметки парковок, статуса парковочных мест, информации о пользователе, а также на сервере происходит обнаружение свободных парковочных мест с использованием получения изображений с камер потокового видео и нейросети MASK R-CNN. Клиент ассистента выполняет функции отображения свободных парковочных мест и навигации до них.

Ключевые слова: открытая парковка, MASK R-CNN, виртуальный ассистент, нейросеть, Яндекс.Карты

VIRTUAL DRIVER'S ASSISTANT FOR SEARCH OF A PLACE IN OPEN PARKING

The article was received by the editorial board on 12.04.2022, in the final version – 26.04.2022.

Kravets Alla G., Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; State University "Dubna", 19 Universitetskaya St., Dubna, Moscow region, 141982, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1675-8652, e-mail: agk@gde.ru

Astankov Alexey A., Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

master student, ORCID: 0000-0001-9236-2292, e-mail: lehaastankov5@mail.ru

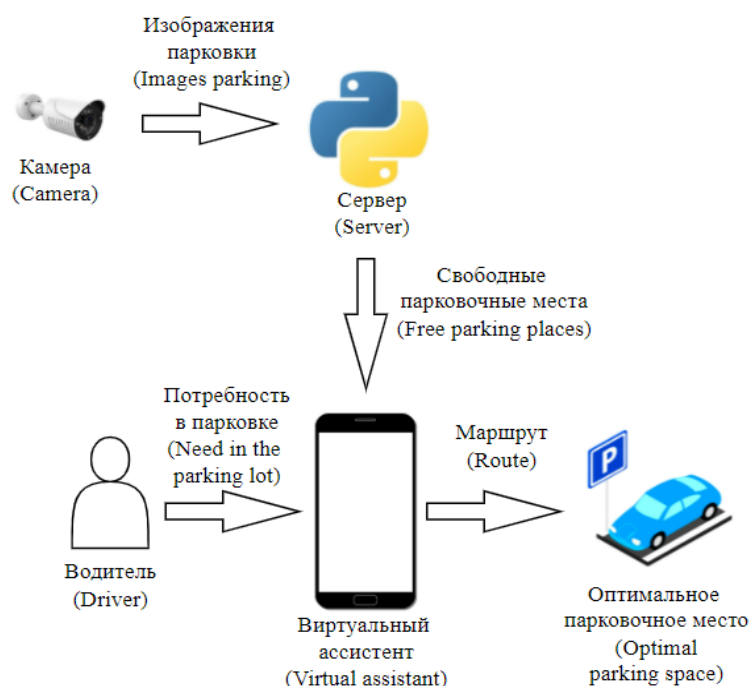
Mokrushin Georgy A., State University "Dubna", 19 Universitetskaya St., Dubna, Moscow region, 141982, Russian Federation,

master student, ORCID: 0000-0001-8098-3550, e-mail: geordanomokrushino@gmail.com

The article discusses the development of a virtual assistant for searching a place in an open parking lot. Most often, when arriving at shopping centers and shops, the driver cannot find a place in open parking lots, and he has to look for it for a long time. This entails an increase in environmental pollution and an increase in the number of accidents. Or drivers have to park their car in the wrong place (carriageway, sidewalk), which leads to incomplete use of the roadway and discomfort to passers-by. The proposed approach helps to solve this problem by quickly navigating to a free parking space in nearby outdoor parking lots. During the study, modern approaches, analogues of systems, were analyzed. A virtual assistant was implemented to simplify the parking process. To test the assistant, images from streaming video cameras were used. The assistant design process, its functions and capabilities were described. The assistant server performs the functions of storing parking markings, parking space status, user information, and free parking spaces are detected on the server using images from streaming video cameras and the MASK R-CNN neural network. The assistant client performs the functions of displaying free parking spaces and navigating to them.

Keywords: open parking, MASK R-CNN, virtual assistant, neural network, Yandex.Maps

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. С каждым годом уровень автомобилизации становится все выше. Например, в России за последние 20 лет он вырос более чем в 2 раза (с 132 авто на 1000 человек до 330 авто на 1000 человек) [1]. По данным Федеральной службы государственной статистики [1], на начало 2020 г. рост количества автомобилей за последние десять лет увеличился в полтора раза, а количество парковочных мест практически не изменилось. На начало 2021 г. количество автомобилей в среднем составляло 319 на 1000 человек, что примерно соответствует 1 автомобиль на семью. Вместе с этим городская инфраструктура усложняется и возникает проблема – увеличенный транспортный поток и сильно загруженные парковочные места. Возникает необходимость правильной логистики процесса паркинга. Наиболее известной методикой оценки уровня развития логистической инфраструктуры следует признать индекс LPI Всемирного банка, основанный на расчете интегрального показателя, включающего шесть комплексных составляющих. Количественное значение индекса эффективности логистики позволяет оценить уровень развития логистической системы страны, в том числе и транспортной инфраструктуры [2]. Недостаток парковочных мест, так же как и обилие «пробок» на дорогах, на сегодняшний день в большинстве мегаполисов входят в список наиболее острых проблем. В больших городах проблема поиска парковочного места является одной из наиболее важных.

Парковка – это неотделимая часть офисного, жилого и административного комплексов, а также крупных объектов культурного отдыха людей, торговых и торгово-развлекательных центров. Одним из элементов комплексной проблемы обеспечения горожан парковочными местами является планирование и управление парковкой возле крупных торгово-развлекательных центров. Чаще всего, приезжая туда, водитель не может найти место на открытых парковках, и ему приходится длительное время искать его в другом месте, тем самым происходит увеличение загрязнения окружающей среды и рост количества ДТП. Особенно ярко это наблюдается в густонаселённых городах, где человек может длительное время искать место для парковки, когда все места на парковках заняты [3]. Следовательно, существуют опасения по поводу заторов на дорогах, а также расхода времени, нерационального расхода топлива и ухудшения качества воздуха из-за выбросов мелкой пыли в жилых и торговых районах [4].

Виртуальный ассистент – система автоматизации взаимодействия с пользователем, реализованная на основе искусственного интеллекта (AI) в диалоговом формате. Сервис осуществляет текстовые и голосовые консультации, обработку заявок и поддержку по направлениям деятельности компании. Пользователь отправляет запрос в чате в свободной текстовой или голосовой форме, а система предоставляет быстрый подходящий ответ [5].

Всё многообразие виртуальных ассистентов можно разделить на бытовые, используемые в личных целях, для досуга, и не связанные с рабочим процессом и функционированием бизнес-систем, и рабочие, используемые для помощи на рабочем месте и в решении бизнес-задач, приложения [6].

Бытовые виртуальные ассистенты делятся на три больших группы:

- для управления устройством, универсальные. Приложения для ежедневного бытового использования, позволяющие осуществлять интернет-поиск, выполнять несложные поручения (например, заказ такси) и принимающие команды на естественном языке в виде текста или речи;
- для взаимодействия с бизнес-приложениями. Ассистенты, интегрированные в мобильные или веб-приложения различных компаний, упрощающие взаимодействия клиентов с компанией и автоматизирующие процесс этого взаимодействия;
- предметно-ориентированные сервисы. Приложения, направленные на решение специфических личных задач, связанных с проведением различных форм досуга, а также делового планирования.

Исходя из этого, было принято решение разработать виртуального ассистента водителя (VDA) в виде мобильного приложения. Основная цель VDA – помочь водителям найти подходящие парковочные места, в режиме онлайн контролировать доступность автостоянок и перенаправить водителей, когда количество свободных мест упадет до критического уровня [7].

Анализ существующих приложений для парковки. На настоящий момент времени имеется ряд мобильных приложений, предоставляющих водителям возможность нахождения свободного места на парковке. Каждое из них имеет свои особенности, преимущества и недостатки, в связи с этим проведем анализ трех самых популярных приложений в официальном магазине ОС Android. Приложение «Парковки Москвы» [8] содержит базу парковок при торговых центрах, вокзалах и аэропортах, а также платных и бесплатных стоянок Москвы. На главном экране представлена карта города с доступными парковками. Чтобы занять место, следует выбрать парковку, удобную по расположению и приемлемую по стоимости, и нажать «добавить автомобиль». Далее появляется окно, где нужно ввести данные о машине и затем оплатить парковку. В приложении можно привязать банковскую карту для быстрой и удобной оплаты, а также изменить или завершить текущую парковку. В боковом меню приложения есть возможность посмотреть историю парковок, а также штрафы и эвакуации.

В приложении «Parkopedia» [9], как и в других аналогах, используется база парковочных мест, что дает возможность проложить маршрут до любого из них. От предыдущего приложения данное отличается тем, что работает не в конкретном городе, а по всему миру. На главном экране расположена карта с доступными парковками, которые можно отсортировать по цене. После выбора парковки показывается ее стоимость, расположение, вместимость и расстояние. В приложении есть список всех доступных парковок, а также в премиум-версии доступен просмотр свободных мест. По заверению разработчиков это приложение поможет найти парковочные места даже в самых экзотичных странах, однако в некоторых городах парковки вообще не показываются, даже если они там есть.

Приложение «ПарКинг» [10] отличается от предыдущих аналогов тем, что запоминает место, где водитель оставил свою машину. С помощью данного приложения можно на карте поставить отметку, где находится автомобиль, и выставить время парковки. На главном экране, как и во всех аналогах, представлена карта, причем не только конкретного города. Внизу карты расположена панель управления, с помощью которой можно изменить выбранное место для парковки, удалить его, проложить к нему маршрут и т.д. При выборе места на карте откроется панель, где можно оставить заметки, добавить фотографию и выставить время парковки. В приложении работает функция навигации, достаточно нажать на карту, поставить метку и откроется приложение карты, установленное на телефоне, с помощью которых выставляется нужный маршрут.

Подробно рассмотрев аналоги разрабатываемого приложения, можно выделить следующие особенности, представленные в таблице.

Таблица 1 – Сравнение аналогов

Название приложения	Достоинства	Недостатки
Парковки Москвы	Показываются все доступные парковки и подробная информация о них. Через приложение можно сразу же оплатить стоимость парковки, посмотреть штрафы и эвакуации. Можно проложить маршрут до выбранной парковки.	Работает лишь в одном конкретном городе России, не показываются свободные места на парковке.
Parkopedia	Удобный фильтр по типу парковки, времени и другим характеристикам. Можно проложить маршрут до выбранной парковки.	Показывается вся карта, а не конкретного города, но в некоторых городах не видны парковки вообще. Есть информация о количестве всех мест на парковке, но информацию о свободных местах можно получить лишь в премиум-версии.
ПарКинг	Можно выбрать любую точку на карте, чтобы припарковать автомобиль, а также проложить маршрут до выбранного места	Не показываются конкретно парковки, нет информации о них (о свободных местах и т.д.). Показывается вся карта, а не конкретного города

Метод динамического управления навигацией. Для повышения эффективности использования парковочных площадей за счет сокращения количества автомобилей, находящихся в движении, в рамках исследования используется метод динамического управления навигацией на открытых парковочных территориях [11]. Несмотря на широкое развитие и использование картографических сервисов [12], было принято решение использовать изображения с реальных потоковых камер видеонаблюдения. Метод заключается в предоставлении в реальном времени автовладельцам, въезжающим на территорию парковки, информации о занятости парковочных мест на основе обработки потокового видео с камер видеонаблюдения, установленных над территорией паркинга. Отличием предлагаемого метода от применяемых в настоящее время является возможность его использования на открытых парковках, которые, как правило, не оснащаются специальным сигнализирующим оборудованием, детекторами занятости и контрольно-пропускными системами, значительной площади.

Основные шаги метода динамического управления навигацией:

- 1) построение информационно-графической модели (ИГМ) открытой парковки;
- 2) актуализация данных ИГМ открытой парковки;
- 3) визуализация ИГМ открытой парковки;
- 4) интерактивное взаимодействие и обработка запросов пользователей в ходе навигации.

Структурно-функциональная модель предлагаемого VDA-подхода в рамках метода динамического управления навигацией изображена на рисунке 1.

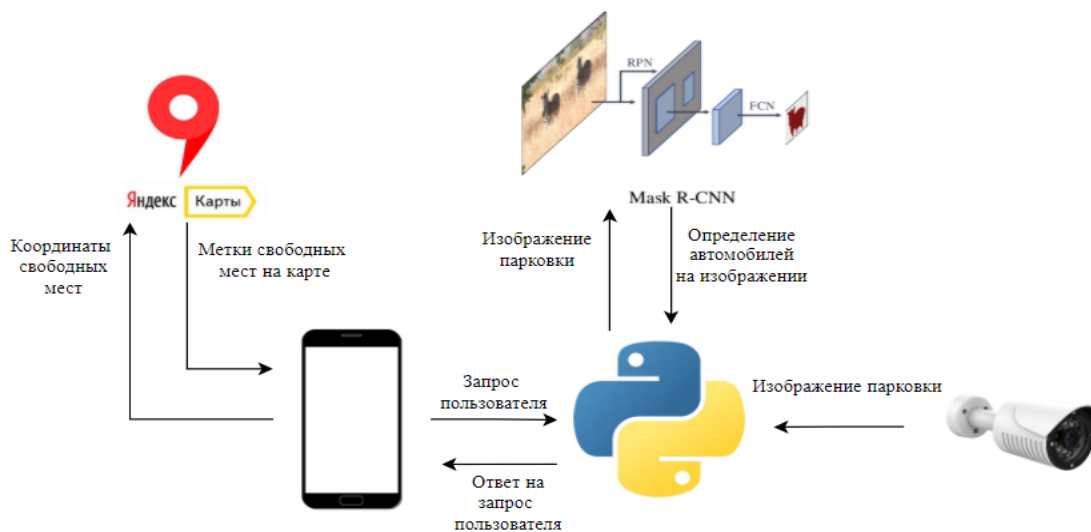


Рисунок 1 – Структурно-функциональная модель VDA

Алгоритм процесса добавления нового места мониторинга. Сборщик изображений (рис. 2) выполняет сбор медиафайлов с камер, зарегистрированных в системе. Это могут быть как потоковые камеры, так и пользовательские устройства. В случае потоковых камер модуль с определенным временным интервалом подключается к зарегистрированным устройствам и делает снимок текущего состояния парковочного места, затем отправляет его в систему хранения.

Основная последовательность сбора изображений:

1. Сборщик изображений опрашивает камеры из списка доступных.
2. Сборщик изображений получает изображение.
3. Сборщик изображений отправляет изображение в файловое хранилище.

Альтернативная последовательность сбора изображений:

1. Сборщик изображений опрашивает камеры из списка доступных.
2. Камеры не доступны.

В случае пользовательского устройства, пользователю необходимо будет зарегистрировать камеру в системе. Для регистрации необходимо в мобильном приложении заполнить форму с указанием адреса, расположения и дополнительных комментариев. Затем установить на свой компьютер сервис, дистрибутив которого будет сгенерирован после заполнения формы. После установки сервис подключится к устройству ввода видео, установленному в системе по умолчанию, и отправит метаданные, собранные при заполнении формы, а также IP-адрес устройства для регистрации в системе. После всех этих действий пользовательское устройство будет направлять снимки с камеры в модуль сборки изображений.

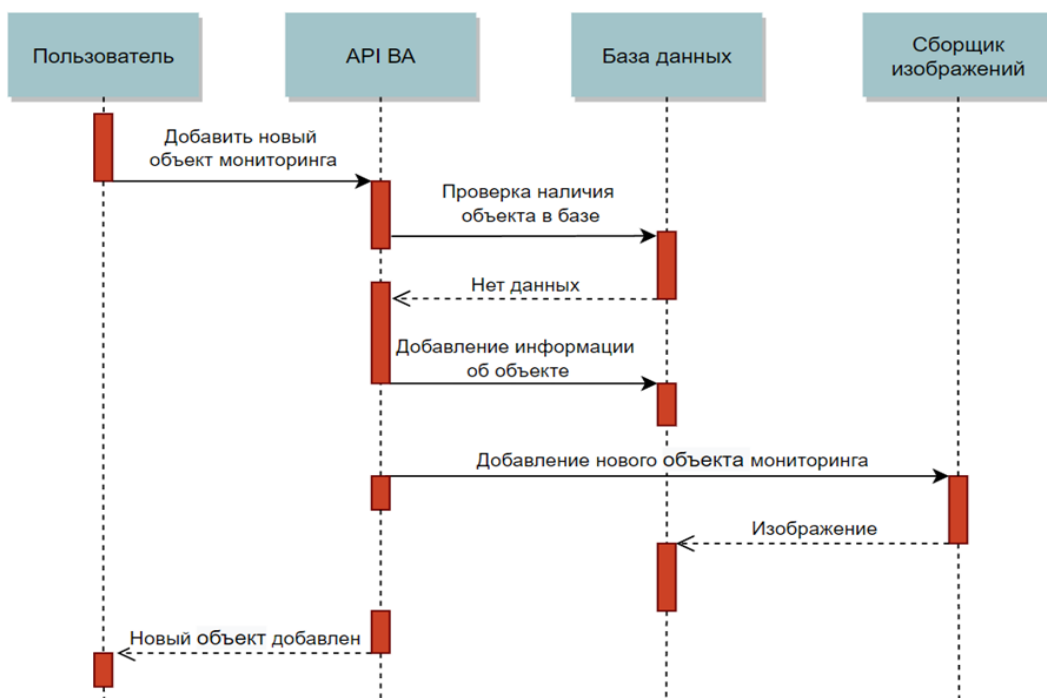


Рисунок 2 – Процесс добавления нового объекта мониторинга

Основная последовательность добавления нового объекта:

1. Пользователь заполняет форму и отправляет запрос на добавление нового объекта мониторинга.
2. Запускает на своем компьютере сгенерированный скрипт.
3. Скрипт обнаруживает устройство и добавляет планировщик для регулярной отправки изображений в систему.
4. При первом запуске скрипта сборщик изображений добавляет устройство в список доступных устройств.
5. Устройство добавлено.

Альтернативная последовательность добавления нового объекта:

1. Пользователь заполняет форму.
2. Мобильное приложение выдает предупреждение о том, что данное местоположение уже существует в системе.

Алгоритм процесса запроса парковочного места. Детализация процесса отправки запроса для проверки парковочного места изображена на рисунке 3.

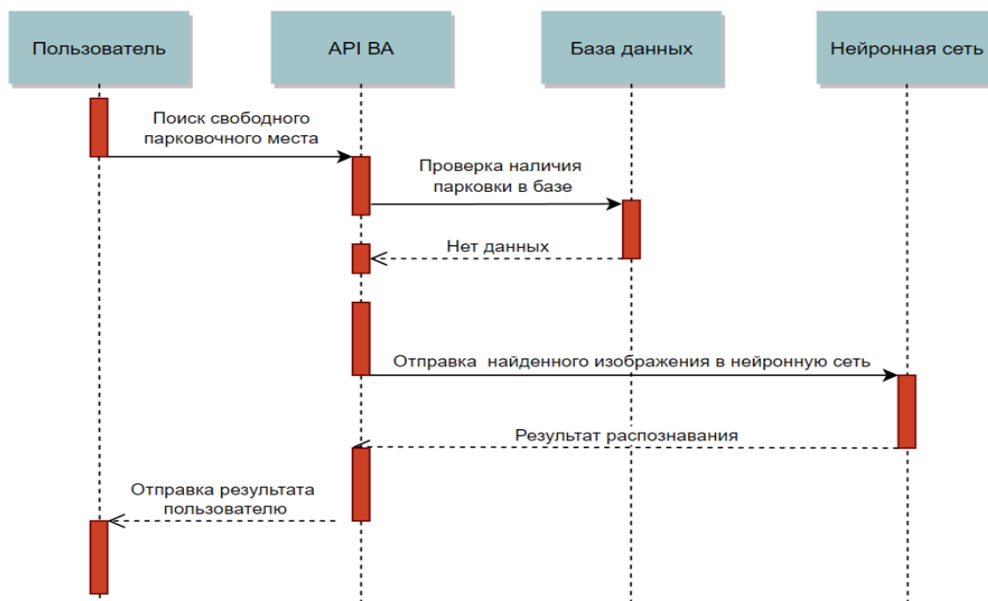


Рисунок 3 – Процесс запроса парковочного места

Пользователь в мобильном приложении отправляет запрос на проверку наличия свободных парковок по заданному адресу. Обращение принимает *API* ВА и проверяет наличие данного адреса в системе хранения медиафайлов. Если такой адрес есть, то изображение с камеры по данному адресу отправляется в модуль обработки изображений и происходит поиск свободных парковочных мест. Если заданного адреса нет в системе хранения, то появится соответствующее сообщение о том, что нет данных по заданному адресу.

Основная последовательность запроса парковочных мест:

1. Пользователь отправляет запрос для проверки свободного парковочного места.
2. Система предоставляет информацию о наличии свободных парковочных мест.

Альтернативная последовательность запроса парковочных мест:

1. Пользователь отправляет запрос для проверки свободного парковочного места.
2. Система сообщает о том, что нет данных по указанному местоположению.

Основная последовательность определения свободных мест:

1. *API* виртуального ассистента отправляет запрос для проверки свободных парковочных мест по заданному местоположению.

2. В нейронную сеть распознавания передается ссылка на файл изображения.

3. Модуль распознавания получает изображение и ищет свободные парковочные места.

4. Информация о наличии свободных парковочных мест отправляется в *API* ВА.

Концепция и сценарии использования VDA. Концепция системы позволяет организовать сервер, где будут присутствовать модули обработчика изображений, сборщика изображений и виртуального ассистента, реализованных на языке Python и с использованием его технологий машинного обучения (рис. 4). Мобильное приложение будет реализовано с использованием технологий Flutter на языке программирования Dart. MySQL будет выбрана в качестве базы данных, поскольку системе важна скорость и большая часть запросов будет направлена на чтение. Файловое хранилище будет представлять собой общий сетевой ресурс, размещенный на твердотельных накопителях SSD.

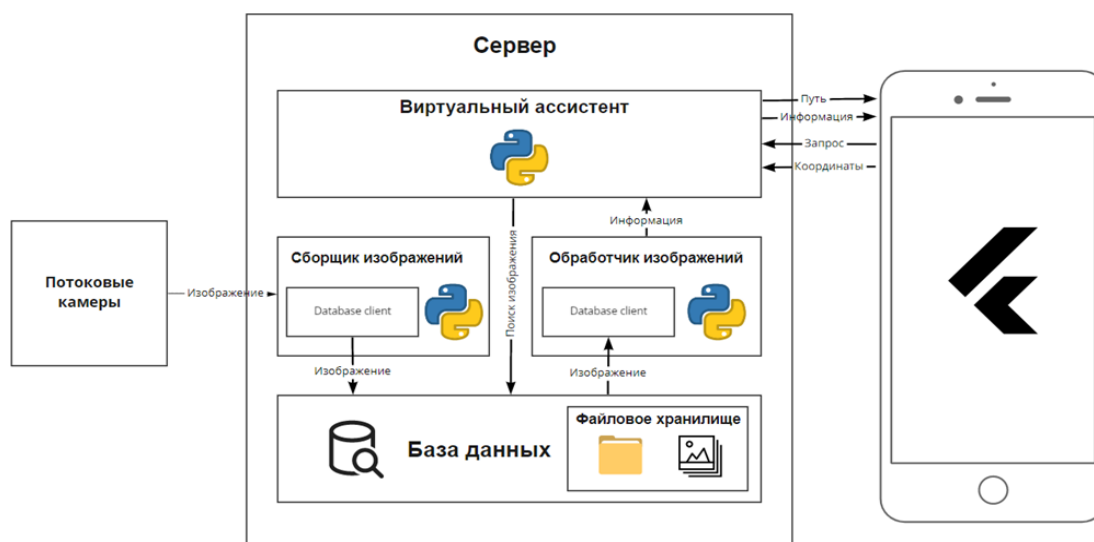


Рисунок 4 – Концептуальная модель системы

Для повышения эффективности работы приложения будут использоваться видеокamеры. Для определения свободных мест будут сравниваться эталонные изображения территории парковки, сделанные в редакторе контуров, и текущее состояние парковочной зоны, взятое с камер.

Взаимодействие между компонентами системы реализуется через *API* виртуального ассистента. Система разделена на 4 основных компонента (рис. 5):

1. Виртуальный ассистент.
2. Обработчик изображений.
3. Сборщик изображений.
4. Мобильное приложение.

Виртуальный ассистент обеспечивает взаимодействие с пользователем мобильного приложения. В его функции входит обработка и валидация запроса, а также отправка ответа пользователю.

Сборщик изображений в определенные промежутки времени опрашивает доступные камеры, список которых находится в БД, и загружает снимки в файловое хранилище. Помимо этого, позволяет добавить новые камеры в список доступных камер.

Обработчик изображений, получив от *API* виртуального ассистента ссылку на изображение проверяет наличие свободных парковочных мест на изображении и отправляет полученную информацию обратно.

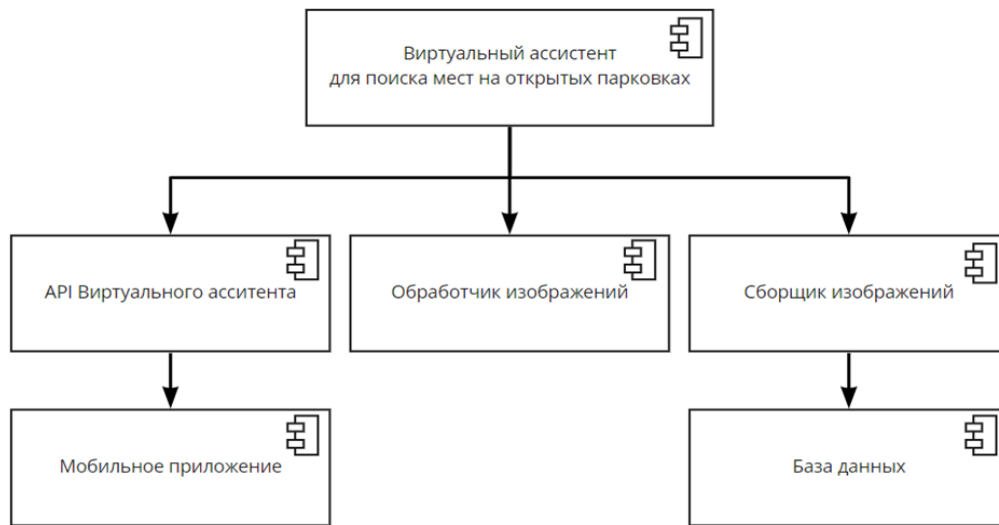


Рисунок 5 – Модель компонентов системы

С помощью мобильного приложения пользователь обращается к системе для поиска свободного парковочного места по заданному адресу. Помимо этого, если пользователь хочет добавить новую камеру для мониторинга своего парковочного места, он может заполнить форму и получить скрипт, который поможет подключить его устройство к системе. В свою очередь, скрипт обратится к модулю сборщика изображений, что позволит добавить устройство в БД в список доступных камер.

Для более детального анализа использования системы в целом и по отдельности ее компонентов была составлена диаграмма прецедентов (рис. 6). Данная диаграмма отражает отношения между прецедентами и акторами [4]. Акторы выделены с учетом взаимодействия подсистем VDA.

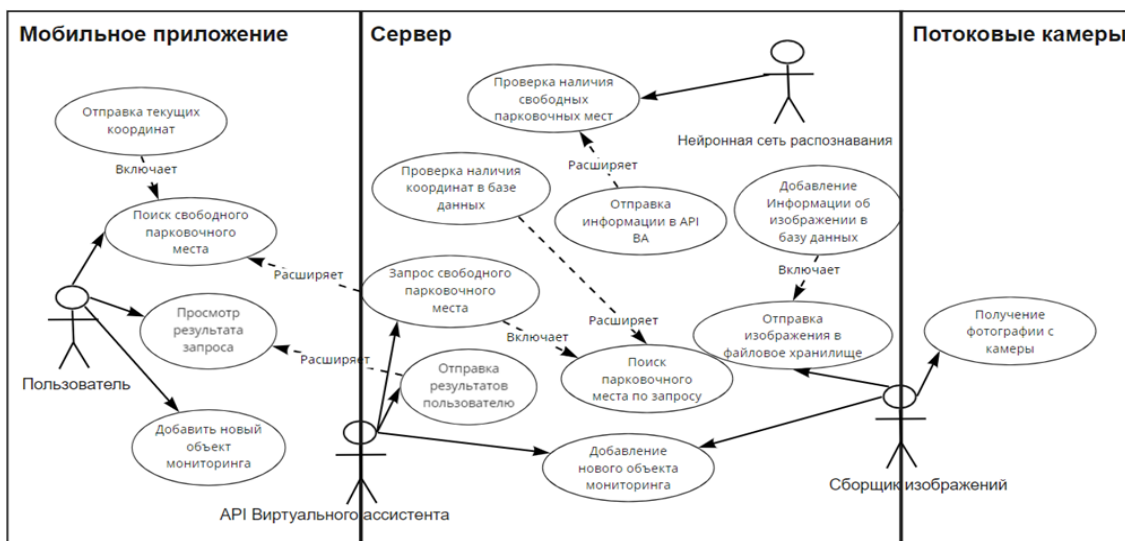


Рисунок 6 – Варианты использования системы

Для актуализации текущего состояния парковочных зон необходимо обрабатывать изображения с камер потокового видео. На изображениях необходимо находить автомобили, для решения этой задачи видео необходимо определять автомобили на изображении. Эту задачу решает нейросеть Mask R-CNN. Mask R-CNN – улучшение алгоритма Faster R-CNN, обеспечивающее осуществление возможности сегментации объектов. На вход нейросети Mask R-CNN подавалось изображение парковок и код искомого объектов (в нашем случае автомобилей). В результате работы алгоритма можно было получить количество найденных автомобилей, а также их пиксельные координаты и координаты свободных мест.

Реализация VDA. На рисунке 7 представлен интерфейс добавления нового объекта мониторинга. Если адрес уже есть в системе, то появится предупреждающее уведомление. В ином случае будет сгенерирован файл с сервисом для установки на ПК.

Рисунок 8 иллюстрирует главное меню и интерфейс поиска парковочных мест по адресу. О наличии либо отсутствии мест будет показано уведомление на карте, а также приложение сообщит информацию голосом.

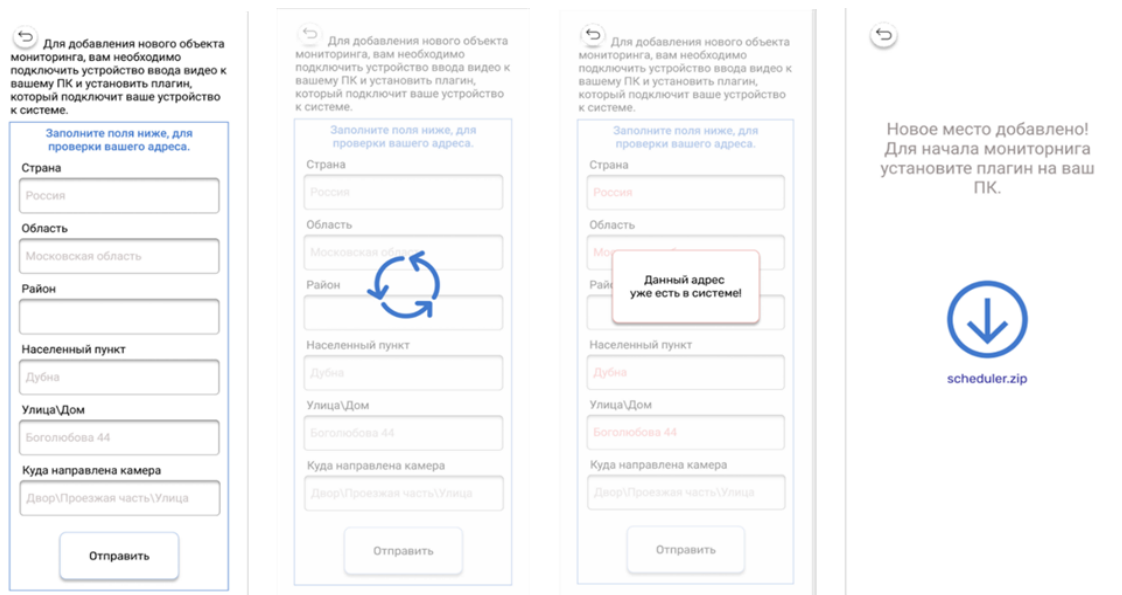


Рисунок 7 – Меню добавления нового объекта мониторинга

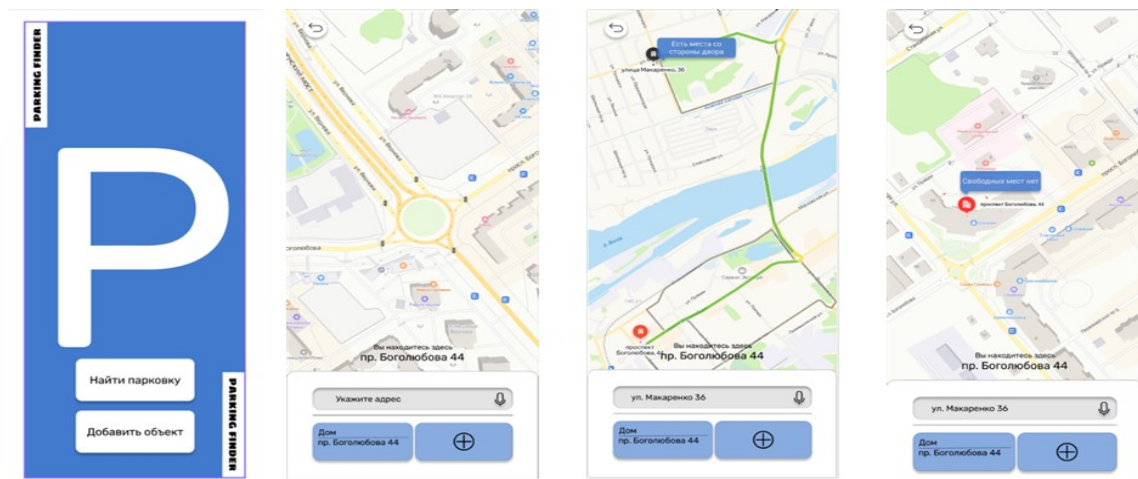


Рисунок 8 – Меню поиска парковочного места

Эксперимент по определению свободного парковочного места. Было подготовлено изображение парковки, на него была добавлена картинка автомобиля. Далее с помощью нейросети Mask R-CNN были обнаружены все автомобили и их координаты (рис. 9). Координаты машин далее используются в качестве данных парковочных мест. Далее использовалось изображение с текущим состоянием парковочной зоны, с этим ним проводилась аналогичный алгоритм определения автомобилей на картинке. Для определения свободных мест была использована мера под названием Intersection Over Union (отношение площади пересечения к сумме площадей) или IoU. Количество пикселей, где пересекаются два объекта, делились на количество пикселей, занимаемых этими объектами. После подсчета IoU для каждого парковочного места, если значение не превышало заданную границу, то парковочное место считается свободным. В результате было найдено пустое парковочное место на изображении (рис. 10).

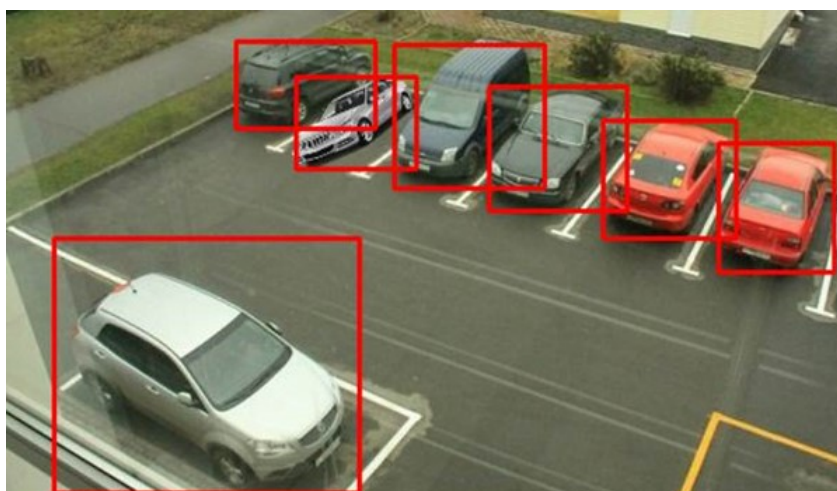


Рисунок 9 – Определение автомобилей на изображении



Рисунок 10 – Определение свободного места на изображении

Заключение. В данной статье мы проанализировали проблему процесса паркинга. Для решения проблемы было принято решение создать виртуального ассистента, который упростит процесс поиска свободного места на открытой парковке. Главная цель ассистента – облегчить процесс поиска места на открытой парковке, что повлечет за собой:

- уменьшение времени на процесс парковки;
- уменьшение ДТП;
- уменьшение количества выхлопных газов;
- уменьшение количества запаркованных автомобилей в неполюженном месте;
- уменьшение негативных эмоций у водителей при процессе парковки своего автомобиля.

У данного виртуального ассистента есть значительные преимущества относительно других аналогов, главные из них – возможность добавления камер, в том числе для мониторинга придомовых территорий, и обработка потокового видео, что позволяет более точно оценивать текущую ситуацию на парковке.

Библиографический список

1. Число собственных легковых автомобилей по субъектам Российской Федерации : Федеральная служба государственной статистики. – 2019. – Режим доступа: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/trans-sv/t3-4.xls, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 11.01.2022).
2. Попов, П. В. Алгоритм оценки уровня эффективности логистической инфраструктуры региона / П. В. Попов, А. Г. Кравец // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 3. – С. 54–61.
3. Киричук, В. В. Решение проблемы нехватки парковочных мест / В. В. Киричук, Д. В. Грунев // VII Международная студенческая электронная научная конференция, г. Великий Новгород, 15 февраля – 31 марта 2018 г. / РАЕ. – Великий Новгород, 2018. – Т. 1. – С. 50–52.
4. Акоюян, Г. В. Проблема недостатка парковочных мест в мегаполисах России. Виды парковок / Г. В. Акоюян. – 2018. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2018/05/86523>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 11.01.2022)

5. Цифровой ассистент на основе искусственного интеллекта | *Digital Design*. – Режим доступа: <https://digdes.ru/nlab/digital-assistent>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 11.01.2022).
6. Обзор персональных цифровых ассистентов 2020.pdf. – Режим доступа: https://actcognitive.org/storage/uploads/docs/Обзор_персональных_цифровых_ассистентов_2020.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 11.01.2022).
7. Цифровой ассистент на основе искусственного интеллекта | *Digital Design*. – Режим доступа: <https://digdes.ru/nlab/digital-assistent>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 24.12.2021).
8. Приложение «Парковки Москвы». – 2020. – Режим доступа: <https://play.google.com/store/apps/details?id=ru.mosparking.appnew&hl=ru> (дата обращения: 11.04.2020).
9. Приложение Parkopedia. – 2020. – Режим доступа: <https://www.parkopedia.com/> свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 11.04.2020).
10. Приложение ПарКинг. – 2020. – Режим доступа: <https://play.google.com/store/apps/details?id=il.talent.parking>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 11.04.2020).
11. Кравец, А. Г. Разработка клиент-серверного приложения динамического управления навигацией на открытых парковках / А. Г. Кравец, Д. А. Skorobogatchenko, А. Р. Агазаян, Д. О. Недоступов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2018. – № 1. – С. 49–61. – DOI 10.24143/2072-9502-2018-1-49-61.
12. Бурова, А. А. Разработка модуля управления данными об объектах на онлайн-карте города / А. А. Бурова, С. С. Буров, Д. С. Парыгин, А. А. Финогеев, В. Э. Рент // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2021. – № 1. – С. 18–27.

References

1. *Chislo sobstvennykh legkovykh avtomobiley po subektam Rossiyskoy Federatsii* [The number of own cars in the constituent entities of the Russian Federation]. Available at: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/trans-sv/t3-4.xls (accessed 11.01.2022).
2. Popov, P. V., Kravets, A. G. Algoritm otsenki urovnya effektivnosti logisticheskoy infrastruktury regiona [Algorithm for assessing the level of efficiency of the logistic infrastructure of the region]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2021, no. 3, pp. 54–61.
3. Kirichuk, V. V., Grunev, D. V. Reshenie problemy nekhvatki parkovochnykh mest [Solving the problem of lack of parking spaces]. *VII Mezhdunarodnaya studencheskaya elektronnoy nauchnaya konferentsiya* [VII International Student Electronic Scientific Conference], Velikiy Novgorod, February 15 – March 31, 2018 / RANH. Velikiy Novgorod, 2018, vol. 1, pp. 50–52.
4. Akobyan, G. V. *Problema nedostatka parkovochnykh mest v megapolisakh Rossii. Vidy parkovok* [The problem of lack of parking spaces in Russian megacities. Types of parking]. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2018/05/86523> (accessed 11.01.2022)
5. *Tsifrovoy assistent na osnove iskusstvennogo intellekta | Digital Design* [Digital assistant based on artificial intelligence | Digital Design]. Available at: <https://digdes.ru/nlab/digital-assistent>, free (accessed 11.01.2022).
6. *Obzor personalnykh tsifrovyykh assistentov 2020.pdf* [Overview of personal digital assistants 2020.pdf]. Available at: https://actcognitive.org/storage/uploads/docs/Overview_of_personal_digital_assistants_2020.pdf/ (accessed 11.02.2022).
7. *Tsifrovoy assistent na osnove iskusstvennogo intellekta | Digital Design* [Digital assistant based on artificial intelligence | Digital Design]. Available at: <https://digdes.ru/nlab/digital-assistent/> (accessed 24.12.2021).
8. *Prilozhenie «Parkovki Moskvy»* [Application "Moscow Parking"]. Available at: <https://play.google.com/store/apps/details?id=ru.mosparking.appnew&hl=ru/> (accessed 11.04.2020).
9. *Prilozhenie Parkopedia* [Parkopedia application]. Available at: <https://www.parkopedia.com/> (accessed 11.04.2020).
10. *Prilozhenie ParKing* [Application Parking]. Available at: <https://play.google.com/store/apps/details?id=il.talent.parking/> (accessed 11.04.2020).
11. Kravets, A. G., Skorobogatchenko, D. A., Agazadyan, A. R., Nedostupov, D. O. Razrabotka klient-servernogo prilozheniya dinamicheskogo upravleniya navigatsiyey na otkrytykh parkovkakh [Development of a client-server application for dynamic navigation control in open parking lots]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics], 2018, no. 1, pp. 49–61. DOI 10.24143/2072-9502-2018-1-49-61.
12. Burova, A. A., Burov, S. S., Parygin, D. S., Finogeev, A. A., Rent, V. E. Razrabotka modulya upravleniya dannymi ob obektah na onlain-karte goroda [Development of the module for management of data about objects on the online map of the city]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2021, no. 1, pp. 18–27.

УДК 378.1+004.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-КОММУНИКАТИВНЫХ И КОГНИТИВНЫХ НАВЫКОВ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ С ЦЕЛЬЮ ФОРМИРОВАНИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫБОРУ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ¹

Статья поступила в редакцию 30.03.2022, в окончательном варианте – 05.05.2022.

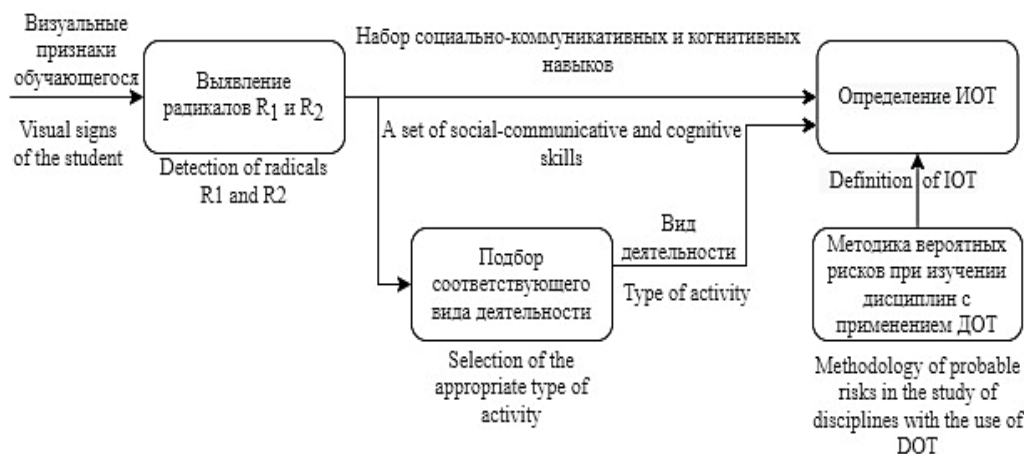
Веснинцева Анастасия Алексеевна, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, магистрант, ORCID: 0000-0002-0042-5346, e-mail: an_vesnaa@mail.ru

Азмухамедов Искандар Маратович, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, доктор технических наук, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности, профессор кафедры информационной безопасности, ORCID: 0000-0001-9058-123X, e-mail: aim_agtu@mail.ru

В данной статье показана актуальность задачи построения психологического профиля обучающегося с целью формирования рекомендаций по выбору индивидуальных образовательных траекторий. Проведен анализ применимости в рамках поставленной задачи различных методик построения психологического профиля обучающегося. В результате анализа был сделан вывод о том, что наиболее подходящей является методика В. Пономоренко «7 радикалов». Сопоставление выявленных с применением указанной методики социально-коммуникативных и когнитивных навыков со сферами трудовой деятельности позволяет более обоснованно формулировать рекомендации по выбору направления и профиля обучения, а также формировать рекомендации по выбору индивидуальных образовательных траекторий.

Ключевые слова: индивидуальная образовательная траектория, профориентация, психологический профиль

Графическая аннотация (Graphical annotation)



DETERMINING THE SOCIO-COMMUNICATION AND COGNITIVE SKILLS OF A STUDENT IN ORDER TO FORM RECOMMENDATIONS FOR THE CHOICE OF AN INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTORY

The article was received by the editorial board on 30.03.2022, in the final version – 05.05.2022.

Vesnintseva Anastasia A., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

undergraduate student, e-mail: an_vesnaa@mail.ru

Azhmukhamedov Iskandar M., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Dean of the Faculty of Digital Technologies and Cybersecurity, Professor of the Department of Information Security, ORCID: 0000-0001-9058-123X, e-mail: aim_agtu@mail.ru

This article shows the relevance of the task of building a psychological profile of a student to form recommendations on the choice of individual educational trajectories. The authors analyzed the applicability of various methods of constructing a psychological profile of a student within the framework of the task. The authors concluded that the most suitable method is V. Ponomorenko's "7 radicals". The comparison of the socio-communicative and cognitive skills identified with the use of this

¹ Статья выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 19-29-14007 мк «Оценка влияния цифровизации образовательного и социального пространства на человека и разработка системы безопасной коммуникативно-образовательной среды».

technique with the areas of work allows us to formulate recommendations on the choice of the direction and profile of training more reasonably, as well as to form recommendations on the choice of individual educational trajectories.

Keywords: individual educational trajectory, career guidance, psychological profile

Введение. Выбор сферы профессиональной деятельности является одним из важнейших выборов, которые делает человек в своей жизни. От того, насколько правильно сделан этот выбор, зависит многое. И цена ошибки в данном случае измеряется не только разочарованием, чувством неудовлетворенности результатами своей деятельности, но и потерянным временем, которое ушло на освоение неверно выбранной профессии. Уменьшить риск неправильного выбора призвана система профориентации.

Президент всероссийского социального проекта ранней профессиональной ориентации школьников «Зеленая кисточка» В. Кузубов считает, что профориентационную работу целесообразно начинать уже с 10–12 лет, поскольку дети в этом возрасте уже достаточно развиты, чтобы воспринимать сложную информацию и начать выбирать будущую профессию [1]. Чем позже молодой человек задумывается над этим выбором, тем сложнее ему бывает сделать его осознанно.

Как показывает статистика, более 30 % абитуриентов, поступающих в вузы РФ, причинами выбора определенного направления обучения называют не внутренне осознанное желание заниматься тем или иным видом деятельности, а то, что поступление в высшее учебное заведение дает им отсрочку от армии, выбранная специальность потенциально может гарантировать высокую заработную плату или должность и т.д. [2]. Многие просто следуют совету родителей, родственников, друзей и в большинстве случаев не имеют четкого представления о будущей профессии и о том, какие навыки и какие черты характера необходимы для того, чтобы преуспеть в выбранной сфере деятельности.

В результате в последние годы заметно снижается количество выпускников, которые после окончания учебных заведений устраиваются на работу по специальности. В 2015–2017 гг. таких выпускников было около 32 % [3]. В 2019 г. их количество составило около 40 % [4]. А в 2021 г. показатель увеличился до 58 % [5].

Преимущественно в системе образования всё еще сохраняется тенденция ориентации обучения на средний уровень способностей и подготовленности к обучению. В такой системе обучающийся выбирает лишь профиль внутри определенного направления и проходит обучение согласно утвержденному вузом учебному плану (рис. 1). Поэтому не каждый обучающийся имеет возможность реализовать свой потенциал в соответствии со своими психологическими способностями и склонностями. Учащиеся с низкой подготовкой и мотивацией не могут найти себя в учебном процессе, а обучающиеся с высокими показателями быстро теряют интерес. Однако ежегодно год в сфере образования происходят изменения для повышения его качества, в том числе одним из последних таких изменений стало внедрение подхода индивидуализации образовательной траектории (ИОТ). Суть ИОТ заключается в том, что все студенты в рамках укрупненных групп специальностей в течение первых двух лет обучения изучают общеобразовательные предметы и обзорные дисциплины, касающиеся тех или иных узкопрофильных направлений (рис. 2). Задача последних – дать понимание вчерашним абитуриентам о специфике того или иного профиля обучения, что позволяет принять более обоснованное решение при выборе дальнейшей личной образовательной траектории, в том числе с учетом социально-коммуникативных и когнитивных навыков.

Индивидуальная образовательная траектория позволяет раскрыть личностный потенциал каждого обучающегося, дает возможность попробовать себя в различных направлениях обучения и сделать взвешенный выбор самостоятельно.

Всё вышесказанное позволяет утверждать, что не только правильный выбор будущей специальности, но и возможность её гибкого освоения предопределяет на сегодняшний день успешность обучения и дальнейшей трудовой деятельности.

Таким образом, проведение профориентационной работы и построения эффективных индивидуальных образовательных траекторий, учитывающих социально-коммуникативные, когнитивные навыки обучающегося, а также его предрасположенность и склонность к тому или иному виду деятельности, является весьма актуальной и важной задачей, позволяющей более эффективно формировать трудовые ресурсы государства.

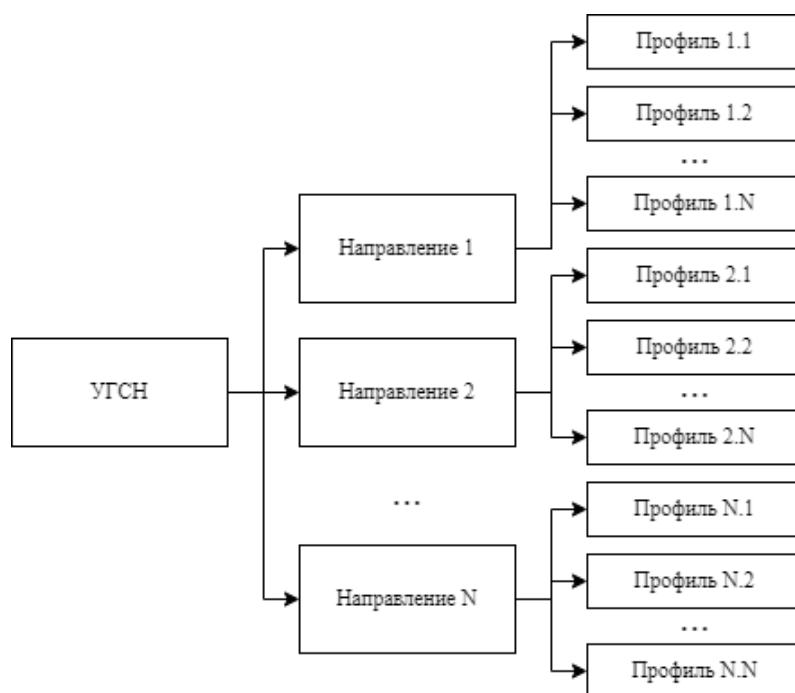


Рисунок 1 – Классическая схема распределения на профили

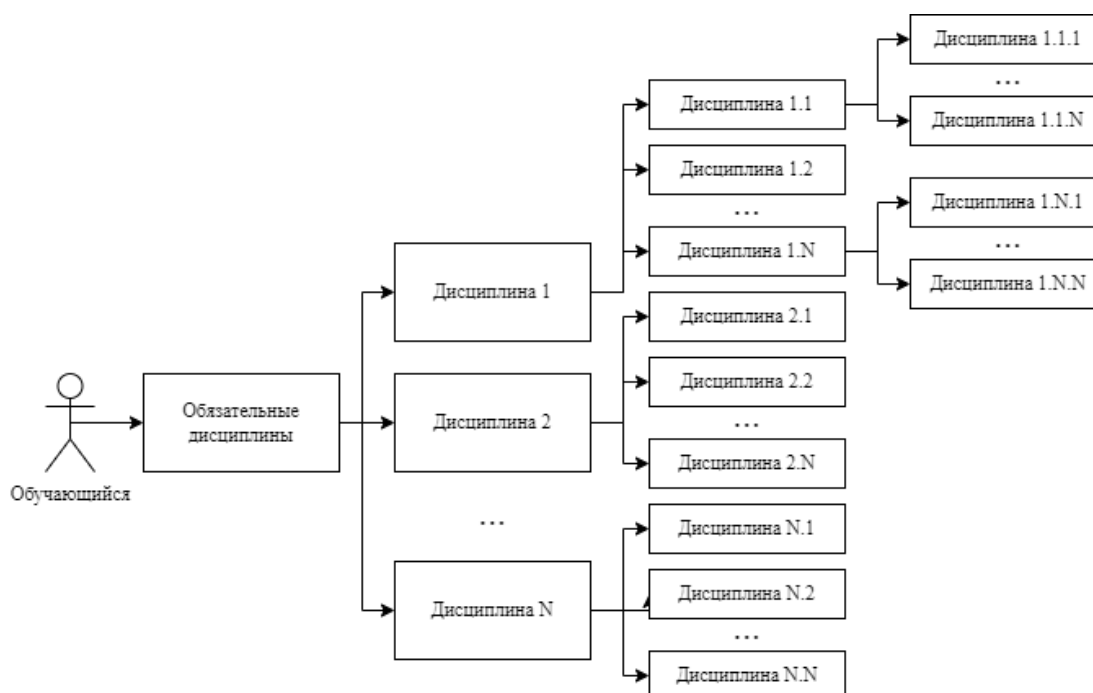


Рисунок 2 – Схема обучения в рамках ИОТ

Анализ методик построения психологического профиля. Провести оценку социально-коммуникативных и когнитивных способностей студентов в рамках построения ИОТ представляется возможным с помощью методик оценки психологических типов личности. Существует достаточно большой перечень методик, направленных на анализ различных характеристик личности.

Один из самых известных методов – «Классификация К. Юнга». Согласно Юнгу, в зависимости от установки сознания и её направленности либо на внутренний процесс, либо на объекты внешнего мира, людей можно разделить на интровертов и экстравертов. Юнг не считал общительность или необщительность главным показателем экстраверсии и интроверсии соответственно, поскольку выделял более существенный отличительный признак – куда направлено сознание и внимание человека, вовне или внутрь, что для него важнее – объекты внешнего мира или внутренние процессы души [6].

Определить психотип человека позволяет также методика «Психогеометрия» американского психолога Сьюзен Деллингер. Согласно её теории, каждый человек ассоциируется с определенной геометрической фигурой (люди-круги, люди-треугольники, люди-квадраты, люди-прямоугольники и люди-зигзаги). «Психогеометрия» – простая и действенная система, позволяющая прогнозировать и оценивать некоторые черты характера, модель поведения и стиль жизни человека [7].

Еще один способ исследования личности – графология. Методика С.Ю. Алексовского и Я.В. Комиссарова позволяет по почерку человека определить его психологические особенности. Но проводить данный психолого-почерковедческий анализ может только профессиональный графолог (специалист по графологии) [8].

Американскими психологами С. Хэтэуэйем и Д. Маккинли был разработан так называемый Миннесотский многоаспектный личностный опросник (ММРП), который позволяет с помощью опроса исследовать индивидуальные особенности и психические состояния человека. В основу методики положено количественное сопоставление ответов тестируемого с типичными ответами людей, у которых в ответах четко преобладал тот или иной психологический синдром [9].

Для построения психологического портрета используется тест англо-американского ученого-теоретика Р. Кэттелла. Его опросник описывает личностную структуру человека, выявляет личностные проблемы, помогает найти коррекционные механизмы для решения личностных проблем. Кэттелла считал, что люди описывают самих себя и других с помощью 16 различных факторов, определяющих их внутреннюю сущность и поведение [10].

Определить психотип можно при помощи «Соционики» А. Аугустинавичюте. «Соционика» – концепция взаимоотношений между личностями. В рамках данной методики людей можно разделить на 16 типов, в зависимости от восприятия ими информации. Аугустинавичюте утверждала, что при помощи «Соционики» можно не только построить психологический портрет человека, но и предсказать его поведение, выявить сильные и слабые стороны характера [11].

Широкой популярностью пользуется также методика «7 радикалов» российского психолога В. Пономаренко, основанная на системном подходе к распознаванию характера. Данная методика удобна тем, что она опирается на наблюдения за поведением и внешностью испытуемого и не требует применения никаких дополнительных специальных процедуры для определения психотипа личности [12].

Для выбора наиболее подходящей методики в рамках поставленной задачи был проведен сравнительный анализ описанных выше видов типирования личности по наиболее значимым критериям. Результаты анализа представлены в таблице.

Таблица – Анализ Методик построения психологического профиля

Название методики	Необходимость анкетирования	Необходимость глубокого собеседования	Степень детализации черт характера	Необходимость участия высококвалифицированного специалиста в «узкой» предметной области	Вывод о степени применимости для задач профориентации ИОТ
«Классификация К. Юнга»	Обязательно. Объем анкеты средний (20 вопросов)	Требуется	Низкая. Типология состоит из 2 категорий	Не требуется	Низкая
«Психогеометрия» С. Деллингер	Необязательно. Объем анкеты очень низкий (1 вопрос)	Не требуется	Средний. Типология состоит из 5 категорий	Не требуется	Выше среднего
Графология С.Ю. Алексовского, Я.В. Комиссарова	Анкетирование не проводится	Не требуется	Средняя. Методика позволяет определить черты характера по почерку	Требуется	Очень низкая
ММРП С. Хэтэуэйема, Д. Маккинелли	Обязательно. Объем анкеты очень высокий (более 500 вопросов)	Не требуется	Выше среднего. Типология состоит из 13 шкал	Не требуется	Низкая
Тест Кэттелла	Обязательно. Объем анкеты высокий (189 вопросов)	Не требуется	Выше среднего. Типология состоит из 16 шкал	Не требуется	Низкая
«Соционика» А. Аугустинавичюте	Обязательно. Объем анкеты выше среднего (35 вопросов)	Не требуется	Средний. Типология состоит из 16 категорий	Не требуется	Средняя
«7 радикалов» В.В. Пономаренко	Необязательно. Объем анкеты низкий (13–15 вопросов)	Не требуется	Выше среднего. Типология состоит из 7 категорий	Не требуется	Выше среднего

Исходя из данных, приведенных в таблице, видно, что наиболее подходящей методикой построения психологического профиля в рамках поставленной задачи является методика «7 радикалов». Данная методика позволяет подробно проанализировать черты характера, при этом нет необходимости в детальном анкетировании или глубоком собеседовании с испытуемыми. «7 радикалов» в основном опирается на визуально наблюдаемые характеристика человека, которые могут быть легко идентифицированы даже при удаленном общении с помощью видеоконференцсвязи. Рассмотрим указанную методику более подробно.

Алгоритм построения психологического портрета на основе методики «7 радикалов». Методика 7 радикалов позволяет быстро и с высокой степенью достоверности оценить социально-коммуникативные и когнитивные навыки обучающегося. Ключевое понятие методики – радикал, или акцентуация – группа однородных психологических качеств. В основе радикала лежат внутренние психические условия – сила и подвижность нервной системы, особенности эмоциональной и интеллектуальной сфер. Одинаковые радикалы встречаются у разных людей. Достаточно знать 7 общих корней, чтобы сложить реальный психологический портрет человека. Выделяют следующие радикалы:

- истероидный (демонстративный);
- эпилептоидный (застывающий и возбудимый);
- паранойальный (целестремленный);
- эмотивный (чувствительный);
- шизоидный (творческий);
- гипертимный (жизнерадостный, оптимистичный);
- тревожный (боязливый).

Целостный характер человека состоит из нескольких радикалов. В каждом человеке присутствуют все 7 радикалов, представленные в разном соотношении. Однако всегда присутствует один наиболее проявляющийся радикал, образующий основу характера и определяющий основной мотив поведения человека, и несколько дополнительных, являющихся поведенческими средствами реализации мотива.

Для каждого радикала имеется свой ряд визуальных признаков, характеризующих:

- внешний вид: телосложение, оформление внешности (стиль одежды, наличие украшений, вид причёски и др.);
- оформление пространства: оформление окружающего предметного мира и интерьера;
- двигательная активность: мимика, жесты, позы человека;
- особенности поведения.

По данным признакам строится психологический профиль человека в виде иерархической последовательности радикалов, расположенных по степени влияния на поведение.

Анализ методики В. Пономаренко позволил составить перечень наблюдаемых внешних признаков, а также сформировать матрицу, отражающую влияние данных признаков на степень выраженности в психологическом профиле человека определенного радикала [13]:

$$M = \{m_{ij}\}, \quad (1)$$

где $m_{ij} \in [0; 1]$ отражает влияние наличия i -го признака S_i ($S_i \in \{0; 1\}$) на уровень присутствия в психологическом профиле радикала R_j .

Из этого следует, что интенсивность проявления в психологическом профиле определенного радикала можно рассчитать, используя следующую формулу [14]:

$$R_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=0}^{N_j} m_{ij} S_i, \quad (2)$$

где N_j – количество признаков, характерных для j -го радикала.

Величина R_j , изменяясь в диапазоне от 0 до 1, количественно отражает интенсивность проявления в психологическом профиле j -го радикала.

Например, пусть количество характерных для какого-либо j -го радикала внешних признаков N_j равно 8 и у испытуемого наблюдается 7 из них ($S_i = 0$ для $i = 8$).

Причем 6 из наблюдаемых признаков обязательны для данного радикала ($m_{ij} = 1$ ($i = 1 \dots 6$)), а о другом известно, что он «может проявляться» при наличии в психологическом профиле данного радикала ($m_{ij} = 0,5$ ($i = 7$)). Тогда, согласно формуле (2), будем иметь:

$$R_j = \frac{1}{8} (1 * 6 + 0,5 * 1) = 0,8.$$

В данном случае интенсивность проявления радикала в психологическом профиле испытуемого равна 0,8.

На практике обычно ограничиваются двумя наиболее ярко проявляющимися в характере радикалами. Таким образом, в результате применения методики «7 радикалов» каждому обучающемуся можно поставить в соответствие кортеж, состоящий из двух наиболее преобладающих у него радикалов:

$$P_i = \langle R_1^i; R_2^i \rangle, \quad (3)$$

где i – номер обучающегося; R_1^i – наиболее проявляющийся радикал i -го обучающегося; R_2^i – второй по значимости радикал.

Значения элементов данного кортежа позволяет определить для каждого обучающегося соответствующий набор его социально-коммуникативных и когнитивных характеристик. Например, если R_1 = «истероидный», а R_2 = «гипертимный», то, согласно методике, такая личность отличается склонностью к экспромту, непредсказуемостью поведения, гибкостью в общении с окружающими. Если же при таком же R_1, R_2 = «эпилептоидный», то в характере индивида преобладают такие черты, как манерность, аккуратность, продуманность каждого действия.

В результате применение методики «7 радикалов» после сопоставления выявленных социально-коммуникативных и когнитивных навыков со сферами трудовой деятельности позволяет более обоснованно сформулировать рекомендации по выбору направления и профиля обучения, а также позволяет выстроить наиболее эффективную ИОТ.

Стоит отметить, что индивидуальная образовательная траектория обучающегося зачастую предусматривает использование дистанционных образовательных технологий (ДОТ), поскольку данный метод обладает целым рядом преимуществ, хотя и не лишен определенных недостатков. Применение ДОТ позволяет индивидуально работать с каждым из обучающихся. Они имеют постоянный доступ ко всем учебным материалам и т.д.

При этом ранее было установлено соответствие между основными радикалами в характере обучающегося и наиболее вероятными рисками, возникающими в процессе обучения в дистанционном формате [10]. Исходя из этого, для каждого студента преподаватель или тьютор могут обоснованно подобрать наиболее подходящие методы и методики изучения тех дисциплин, которые необходимы для получения выбранной специальности.

Методика формирования рекомендаций по выбору ИОТ. Таким образом, методику формирования рекомендаций по выбору ИОТ можно представить в виде последовательности следующих шагов:

1. Определение визуальных признаков обучающегося, характерных для различных радикалов, и занесение результатов в базу данных с помощью специально разработанной программы [15].
2. Проведение при необходимости дополнительного анкетирования.
3. Выявление наиболее характерных для обучающегося радикалов R_1 и R_2 и определение соответствующих данному набору социально-коммуникативных и когнитивных навыков.
4. Определение видов деятельности, наиболее подходящих для выявленного психотипа обучающегося, подбор соответствующего направления в учебном заведении и формирование набора дисциплин для изучения.
5. Определение на основе ранее предложенной в работе [16] методики вероятных рисков при изучении части дисциплин с применением ДОТ.
6. Подбор преподавателем (тьютором) совместно с психологом на основе представленной информации (в том числе информации о возможных рисках при использовании ДОТ) наиболее подходящих методов и методик изучения дисциплин, определенных в пункте 4.
7. Выдача полученной информации преподавателю (тьютору) и обучающемуся.

Выводы. Предложенная в данной работе методика позволяет составить индивидуальную образовательную траекторию с учетом социально-коммуникативных и когнитивных навыков обучающегося, предоставляя ему возможность освоить выбранную специальность наиболее комфортно и эффективно и в дальнейшем не разочароваться в выбранной сфере деятельности.

Библиографический список

1. Коган, Е. А. Отношение будущих инженеров к работе по специальности: престижность и востребованность профессии / Е. А. Коган, Т. В. Семёнова // Перспективы науки и образования. – 2018. – № 2 (32).
2. Оптимальный возраст для профориентации – 10–12 лет. – Режим доступа: <https://academia.interfax.ru/ru/analytics/research/2147/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 14.04.2022).
3. Соответствие работы трудоустроенных выпускников выпуска специальности, полученной в образовательной организации высшего образования. – Режим доступа: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/met-vps4\(1\).htm](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/met-vps4(1).htm), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 14.04.2022).
4. Исследование показало, сколько выпускников вузов работают по специальности. – Режим доступа: <https://ria.ru/20190902/1558146808.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 14.04.2022).
5. Почему так много россиян работают не по специальности. – Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/career/articles/2021/09/06/885470-rabotayut-spetsialnosti>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 14.04.2022).
6. Jung, C. G. Psychologische Typen / C. G. Jung. – Zurich : Rascher Verlag, 1921. – 708 p.
7. Dellinger, S. Psycho-geometrics: How to Use Geometric Psychology to Influence People/ S. Dellinger. – Prentice Hall, 1989. – 204 p.
8. Алесковский, С. Ю. Основы графологии : учебно-методическое пособие / С. Ю. Алесковский, Я. В. Комиссарова. – Москва : Юрлитинформ, 2006. – 216 с.
9. Butcher, J. N. Minnesota Multiphasic Personality Inventory / J. N. Butcher. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2010. – Vol. 4. – DOI 10.1002/9780470479216.corpsy0573.
10. Батаршев, А. В. Многофакторный личностный опросник Р. К. Кэттелла. Практическое руководство / А. В. Батаршев. – Москва : Сфера, 2002. – 96 с.
11. Аугустинавичюте, А. Соционика / А. Аугустинавичюте. – Москва : Черная белка, 2008. – 568 с.

12. Пономаренко, В. В. Практическая характерология. Методика 7 радикалов / В. В. Пономаренко. – Москва : АСТ, 2019. – 224 с.
13. Ажмухамедов, А. И. Модели и методы информационной поддержки управления социальной подсистемой организации на основе нечеткого когнитивного подхода : дис. ... канд. техн. наук / А. И. Ажмухамедов. – Тамбов, 2017. – 159 с.
14. Ажмухамедов, И. М. Методика формирования команды для реализации IT-проектов на основе нечеткой когнитивной модели оценки компетенций / И. М. Ажмухамедов, А. И. Ажмухамедов // Прикладная информатика. – 2011. – № 4 (34).
15. Ажмухамедов, И. М. Программный продукт для управления рисками при использовании цифровой образовательной среды / И. М. Ажмухамедова, В. Ю. Кузнецова, А. В. Станишевская // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 3 (55).
16. Ажмухамедов, И. М. Оценка восприимчивости участника образовательного процесса к рискам цифрового обучения в зависимости от его психологического профиля / И. М. Ажмухамедова, В. Ю. Кузнецова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 2 (54).

References

1. Kogan, E. A. Otnoshenie budushchikh inzhenerov k rabote po specialnosti: prestizhnost i vostrebovannost professii [Attitude of future engineers to work in their specialty: prestige and demand for the profession]. *Perspektivy nauki i obrazovaniya* [Prospects for Science and Education]. 2018. no. 2 (32).
2. *Optimalnyy vozrast dlya proforientatsii – 10–12 let* [The optimal age for career guidance is 10–12 years old]. Available at: <https://academia.interfax.ru/ru/analytics/research/2147/> (accessed 04.04.2022).
3. *Sootvetstvie raboty trudoustroennykh vypusknikov vypuska specialnosti, poluchennoy v obrazovatelnoy organizatsii vysshego obrazovaniya* [Compliance of the work of employed graduates of the specialty obtained in an educational organization of higher education]. Available at: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/met-vps4\(1\).htm](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/met-vps4(1).htm) (accessed 04.04.2022).
4. *Issledovanie pokazalo, skolko vypusknikov vuzov rabotayut po specialnosti* [The study showed how many university graduates work in their specialty]. Available at: <https://ria.ru/20190902/1558146808.html> (accessed 04.04.2022).
5. *Pochemu tak mnogo rossiyan rabotayut ne po specialnosti* [Why do so many Russians work outside of their specialty]. Available at: <https://www.vedomosti.ru/career/articles/2021/09/06/885470-rabotayut-spetsialnosti> (accessed 04.04.2022).
6. Jung, C. G. *Psychologische Typen*. Zurich, Rascher Verlag, 1921. 708 p.
7. Dellinger, S. *Psycho-geometrics: How to Use Geometric Psychology to Influence People*. Prentice Hall, 1989. 204 p.
8. Aleskovskiy, S. Yu., Komissarova Ya. V. *Osnovy grafologii : uchebno-metodicheskoe posobie* [Fundamentals of graphology educational and methodical manual]. Moscow, Yurlitinform Publ., 2006. 216 p.
9. Butcher, J. N. *Minnesota Multiphasic Personality Inventory*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2010, vol. 4. DOI 10.1002/9780470479216.corpsy0573.
10. Batarshhev, A. V. *Mnogofaktornyy lichnostnyy oprosnik R. K. Kettella. Prakticheskoe rukovodstvo* [Multifactor personality questionnaire R. K. Cattell. Practical guidance]. Moscow, Sfera Publ., 2002. 96 p.
11. Augustinavichute, A. *Sotsionika* [Socionics]. Moscow, Chernaya belka Publ., 2008. 568 p.
12. Ponomarenko, V. V. *Prakticheskaya kharakterologiya. Metodika 7 radikalov* [Practical characterology. 7 radicals technique]. Moscow, AST Publ., 2019. 224 p.
13. Azhmukhamedov, A. I. *Models and methods of information support for managing the social subsystem of an organization based on a fuzzy cognitive approach* [Models and methods of information support for managing the social subsystem of an organization based on a fuzzy cognitive approach]. Tambov, 2017. 159 p.
14. Azhmukhamedov, I. M., Azhmukhamedov, A. I. Metodika formirovaniya komandy dlya realizatsii IT-proektov na osnove nechetkoy kognitivnoy modeli otsenki kompetentsiy [Team formation methodology for the implementation of IT projects based on a fuzzy cognitive model for assessing competencies]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], 2011, no. 4 (34).
15. Azhmukhamedov, I. M., Kuznetsova, V. Yu., Stanishevskaya, A. V. Programmnyy produkt dlya upravleniya riskami pri ispolzovanii tsifrovoy obrazovatelnoy sredy [A software product for risk management when using a digital educational environment]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2021, no. 3 (55).
16. Azhmukhamedov, I. M., Kuznetsova, V. Yu. Otsenka vospriimchivosti uchastnika obrazovatel'nogo protsessa k riskam tsifrovogo obucheniya v zavisimosti ot ego psikhologicheskogo profilya [Assessment of the susceptibility of a participant in the educational process to the risks of digital learning, depending on his psychological profile]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2021, no. 2 (54).

DOI 10.54398/20741707_2022_2_52
УДК 004.02

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОГРАММНО-ЦЕЛЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Статья поступила в редакцию 20.04.2022, в окончательном варианте – 16.05.2022.

Скульский Дмитрий Владимирович, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, аспирант, ORCID: 0000-0001-8531-812X, e-mail: dmitryskulsky@yandex.ru

Шуршев Валерий Федорович, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000_0001_6473_5418, e-mail: v.shurshev@mail.ru

Шикольский Михаил Игорьевич, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000_0002_7899_0417, e-mail: shikul_m@mail.ru

В статье рассмотрены понятие и методы программно-целевого планирования с позиций различных ученых. Выявлено, что сейчас нет единого мнения о структуре и методах программно-целевого планирования. Составлена обобщенная схема программно-целевого планирования. Программно-целевое планирование в муниципальных образованиях реализовано в виде муниципальных программ. Муниципальные программы содержат цели и задачи программы, целевые показатели (индикаторы) программы, сроки и этапы реализации программы, ресурсное обеспечение. Исследованы и описаны бизнес-процессы составления, согласования и мониторинга выполнения муниципальных программ с помощью нотации IDEF0. Отмечено, что в настоящее время бизнес-процессы в администрации муниципального образования «Город Астрахань» не автоматизированы. Описан проект информационной системы для программно-целевого планирования в муниципальном образовании, включающий постановку задач, алгоритмы работы системы и структуру базы данных. Основные функции системы: формирование и согласование муниципальных программ, расчет коэффициентов эффективности муниципальной программы, мониторинга реализации муниципальной программы, формирование отчетов и предоставление информации об исполнителях и соисполнителях программы, о проекте и его реализации. Для определения целей и показателей муниципальной программы предложено использовать сбалансированную систему показателей (ССП, Balanced Scorecard, BSC). Описаны показатели, позволяющие оценить эффективность реализации муниципальной программы. Определены перспективы развития и внедрения информационной системы.

Ключевые слова: программно-целевое планирование, муниципальная программа, информационная система, сбалансированная система показателей, показатели эффективности муниципальной программы

AUTOMATION OF PROGRAM-TARGET PLANNING PROCESSES

The article was received by the editorial board on 20.04.2022, in the final version – 16.05.2022.

Skulsky Dmitry V., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0000_0001_8531_812X, e-mail: dmitryskulsky@yandex.ru

Shurshev Valery F., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

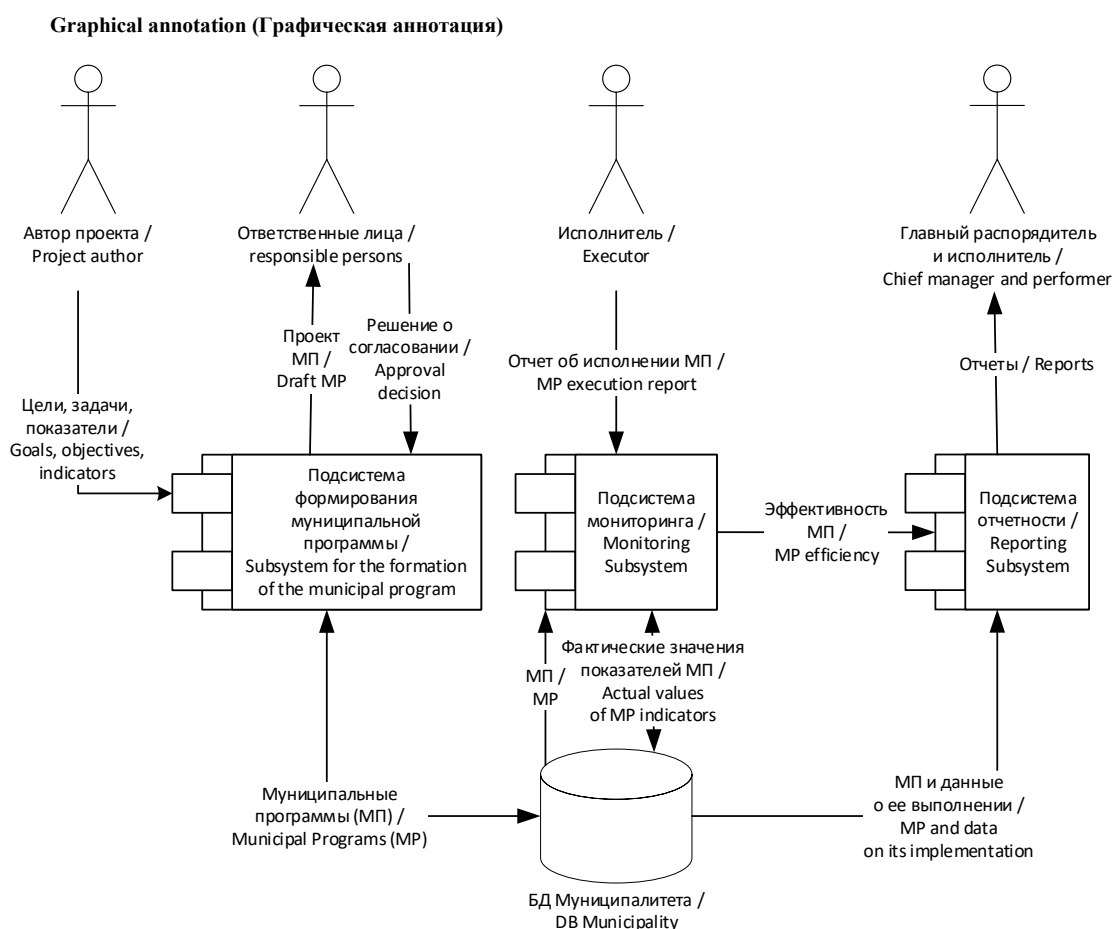
Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000_0001_6473_5418, e-mail: v.shurshev@mail.ru

Shikulsky Mikhail I., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000_0002_7899_0417, e-mail: shikul_m@mail.ru

The article considers the concept and methods of program-target planning from the positions of various scientists. It was revealed that now there is no consensus on the structure and methods of program-targeted planning. A generalized scheme of program-target planning has been compiled. Program-target planning in municipalities is implemented in the form of municipal programs. Municipal programs contain the goals and objectives of the program, target indicators (indicators) of the program, terms and stages of the program implementation, resource provision. The business processes of drawing up, coordinating, and monitoring the implementation of municipal programs using the IDEF0 notation have been researched and described. It is noted that at present, business processes in the administration of the municipal formation "City of Astrakhan" are not automated. The project of an information system for program-targeted planning in a municipality is described, including the setting of tasks, algorithms for the system operation and the structure of the database. The main functions of the system: the formation and coordination of municipal programs, the calculation of the efficiency coefficients of the municipal program, monitoring the implementation of the municipal program, generating reports and providing information about the executors and co-executors of the program, about the project and its implementation. To determine the goals and indicators of the municipal program, it is proposed to use a balanced scorecard (BSC, Balanced Scorecard, BSC). The indicators are described that allow evaluating the effectiveness of the implementation of the municipal program. The prospects for the development and implementation of the information system are determined.

Keywords: program-target planning, municipal program, information system, balanced scorecard, performance indicators of the municipal program



Введение. В современном обществе одной из ключевых задач местного управления является стратегическое планирование развития территорий для комплексного решения проблем региона. Основными задачами социально-экономического развития муниципального образования являются научно-техническое развитие, технологическое перевооружение базовых отраслей, повышение качества жизни. От качества составленного плана и контроля за его исполнением зависит эффективность управления территориями, доверие населения к власти, адаптация условий функционирования региона к реальным потребностям муниципального образования.

В настоящее время для стратегического управления развитием Астраханской области активно внедряется программно-целевое планирование. Программно-целевое планирование предполагает постановку целей, которые необходимо достигнуть. При этом для достижения целей определяется ряд мероприятий, которые находят свое отражение в специальном комплекте документов, называемых муниципальной программой. Задача составления муниципальных программ многогранна и требует комплексного подхода к ее решению. Одной из важных составляющих, необходимых для эффективного составления и поддержки муниципальных программ является автоматизация. В настоящее время все муниципальные программы в Астраханской области составляются в ручном режиме. Поэтому авторами был разработан проект, направленный на решение данной проблемы.

Понятие и методы программно-целевого планирования. Для автоматизации задачи составления муниципальных программ необходимо было изучить суть понятий программно-целевого планирования и муниципальной программы, а также особенности реализации программ на территории Астраханской области.

Вопросами программно-целевого планирования занималось значительное число различных ученых. При этом наблюдаются существенные расхождения в понимании основных терминов и методов реализации данной концепции.

Дж. Розенцвейг, Ф. Каст, Р. Джонсон в своей монографии «Теория управления системами» указывали, что развитие организации может быть достигнуто только посредством программного типа управления.

В.С. Рапопорт и Л.В. Родионова в основе программно-целевого управления предлагают использовать матричную организационную структуру, которая, с их точки зрения, позволит наиболее эффективно реализовать мероприятия, указанные в программе. Они предлагают в организационной структуре вводить специальные должности, ответственные за достижение целей программы [2].

С этой точкой зрения солидарна Е.В. Руднева, которая предлагает ввести специальный орган управления для координации работы над программой (комиссии ГОЭЛРО при ВСНХ) [3].

В то же время с позиции А.Д. Самохина для внедрения программно-целевого управления нет необходимости в создании специальной организационной структуры. Достаточно определить круг лиц, надежных полномочиями постановки ключевых целей.

Также наблюдаются существенные расхождения в понимании методов реализации программно-целевого подхода:

- определение проблем, для решения которых требуется составление программы;
- составление и оптимизация программ;
- оценка и распределение ресурсов между мероприятиями программы;
- организация системы управления программой и обеспечения организационного взаимодействия;
- управление и контроль за исполнением программ.

Так, Ю.Н. Казанский под методами понимает подход к осуществлению конкретной программы в рамках сферы ее применения. То есть он в качестве методов рассматривает только этап управления и контроля за исполнением программ [8].

С точки зрения М.Ю. Кривошеевой, наоборот, программно-целевой метод включает определение основных целей и задач культурного, экономического, экологического, социального и государственного территориального развития, составление планов по их реализации в заранее определенные сроки (т.е. только этап составления программы) [9].

Б.А. Райзберг, А.Г. Лобко, Е.П. Голубков, Л.С. Пекарский рассматривают методы как в широком, так и в узком аспектах. В широком аспекте они предлагают применять системный подход для решения объемных и сложных проблем программно-целевого управления. Под сложными они понимают те задачи, которые не могут быть решены в ходе естественного процесса [10]. При этом в качестве методов реализации программно-целевого подхода ученые рассматривают способы решения указанных проблем (предпринимаемые меры).

В узком аспекте данные исследователи понятие методов программно-целевого управления сводят только к составлению и реализации целевых программ конкретного вида [1].

Идею применения системного комплексного подхода в качестве основы программно-целевого планирования предлагают такие ученые, как Н. Стефанов, К. Симеонов, К. Костев, С. Качаунов, С.Р. Микулинский, Х.Г. Попов, П. Друкер, С.А. Репин, С.В. Кропачев и Е.А. Наумов. Их позиции переключаются между собой и рассматривают программу с позиции целостности ее элементов (системный подход) по всем направлениям (комплексный подход).

При этом во всех работах не учитывается адаптивность программы к изменяющимся условиям внешней среды. Попытку отразить детерминированность территорий от окружения предприняли американские ученые Д. Кац и Р. Кан. Они считают, что, с одной стороны, должен обеспечиваться баланс между стабильностью системы и ее адаптивностью к внешней среде, с другой стороны, система должна динамически самоорганизовываться с учетом изменений во внешней среде.

Обобщая характеристики и методы программно-целевого управления, предлагаемые различными исследователями, можно отметить сложность ее структуры и наличие целого ряда требований к ее реализации, которые следует учитывать при разработке целевых программ (рис. 1).



Рисунок 1 – Структура программно-целевого планирования

Исследование бизнес-процессов. Бизнес-процессы реализации муниципальных программ были исследованы и описаны в виде модели в нотации IDEF0 на примере Астраханского региона. Обобщенная схема бизнес-процессов представлена в виде диаграммы дерева узлов на рисунке 2.

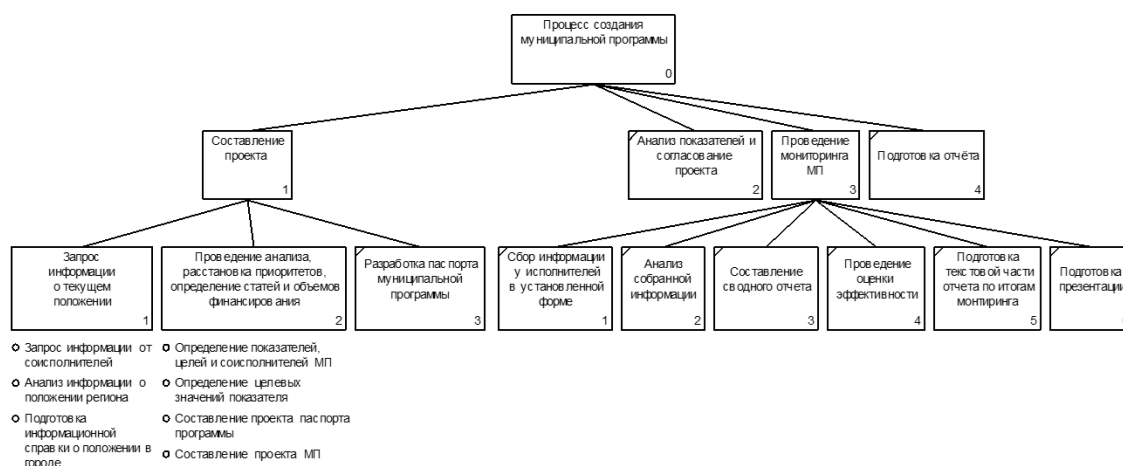


Рисунок 2 – Диаграмма дерево узлов

Для построения модели на первом этапе было проведено описание системы и ее взаимодействие с окружающим миром с помощью контекстной диаграммы (рис. 3).

Взаимодействие работ с внешним миром и между собой описано в виде стрелок, которые представляют собой необходимую информацию. В нотации IDEF0 связь системы с внешней средой описывается с помощью четырех типов стрелок:

- 1) управление (нормативные документы, регламентирующие систему): нормативно-правовая база, национальный проект, государственная программа, постановления, положения и прочие административные документы;
- 2) вход (информация и документы, необходимые для функционирования системы): полученная информация о текущем положении в регионе, информация о целевых показателях по государственной программе, информация о реализации проекта;
- 3) механизм (организации, подразделения или индивидуальные лица, ответственные за функционирование системы): исполнитель муниципальной программы (ответственный исполнитель), руководитель проекта программы, глава администрации;
- 4) выход (результат работы системы): муниципальная программа, отчет перед главой администрации (о реализации программы).

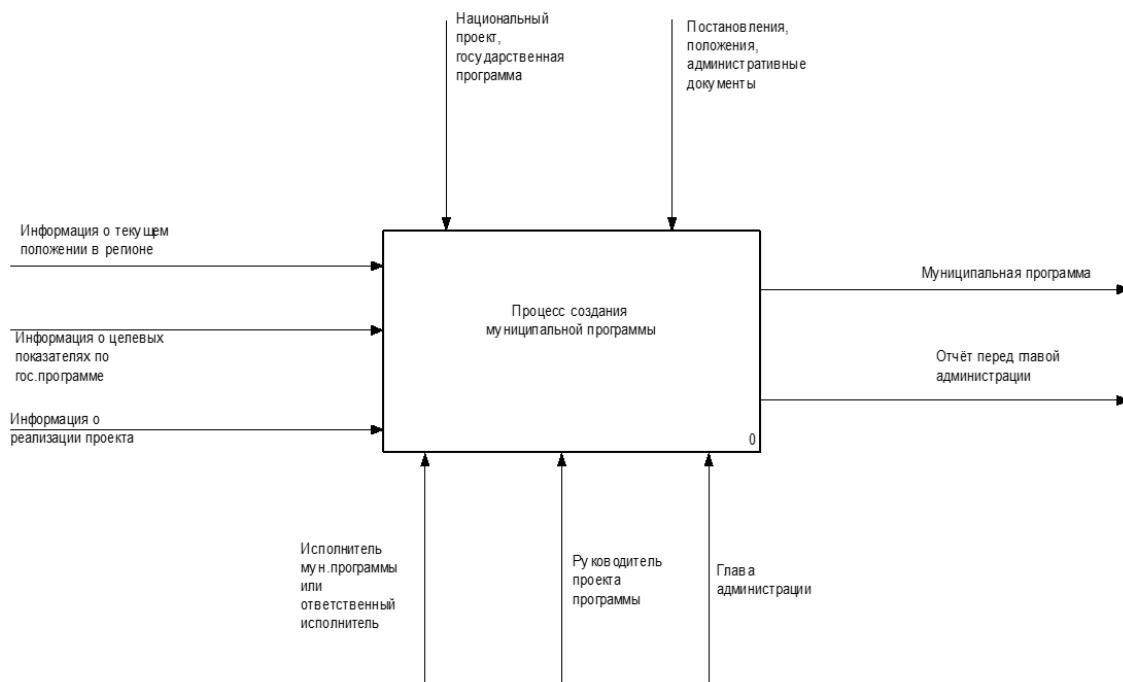


Рисунок 3 – Контекстная диаграмма бизнес-процессов

Система была декомпозирована на подсистемы и рассмотрена более подробно с учетом связей между основными этапами реализации программ (рис. 4).

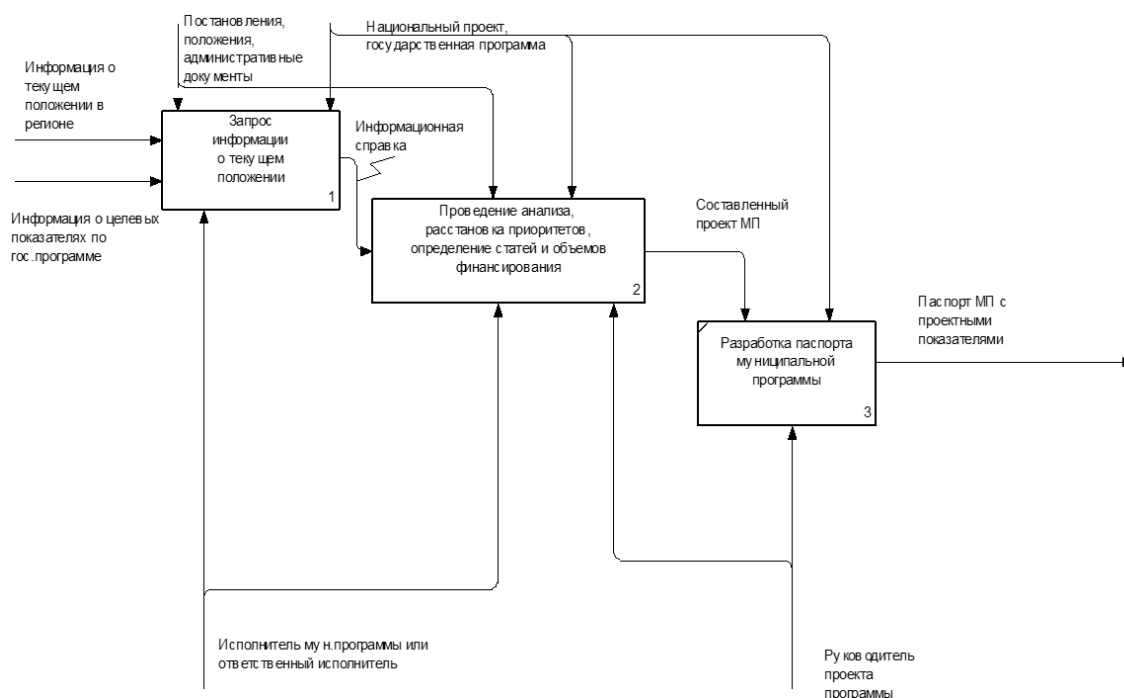


Рисунок 4 – Диаграмма декомпозиции

Муниципальная программа формируется ответственным исполнителем – структурным подразделением администрации муниципального образования «Город Астрахань» на основании собранных информационных справок из различных ведомств о положении в городе. Собранные данные служат основанием для выявления проблем региона, определения приоритетных целей и разработки паспорта муниципальной программы.

В паспорте муниципальной программы указываются:

- наименование программы;
- основания для разработки программы;
- ответственный исполнитель и соисполнитель;
- подпрограммы муниципальной программы, в том числе ведомственные целевые программы, входящие в ее состав (формируется механизм реализации);
- цели программы;
- задачи программы;
- целевые показатели (индикаторы) программы;
- сроки и этапы реализации программы;
- объем и источники финансирования муниципальной программы (ресурсное обеспечение);
- ожидаемые конечные результаты реализации программы;
- система организации контроля за исполнением муниципальной программы (расчет оценки эффективности).

Фактически паспорт содержит основные характеристики муниципальной программы. Более детально планы по реализации муниципальных программ описываются с помощью документов:

- перечня программных мероприятий, показателей (индикаторов) и результатов муниципальной программы;
- таблицы распределения расходов на реализацию муниципальной программы;
- методики оценки эффективности программы;
- пояснительной записки к проекту программы;
- списка рассылки – перечня ответственных лиц, которым направляется бумажная или цифровая копия документа;
- бланка согласования.

После составления всех необходимых документов происходит их согласование с ответственными исполнителями и соисполнителями программ.

Первым этапом согласования проекта муниципальной программы (или проекта внесения изменений в утвержденную муниципальную программу) является ее утверждение и подпись руководителем структурного подразделения, являющегося ответственным исполнителем муниципальной программы.

Финансово-казначейское управление администрации согласовывает проект муниципальной программы в части соответствия финансовых показателей утвержденному бюджету, после чего руководителем структурного подразделения подписывается заключение, которое может быть как положительным, так и отрицательным (при отрицательном – проект возвращается на доработку ответственному исполнителю).

При положительном заключении проект программы направляется в управление экономического развития, где проводится анализ соответствия показателей и финансирования. При тесном взаимодействии с ответственным исполнителем проходит процедура уточнения данных и составляется заключение.

Также программа должна быть согласована с рядом подразделений:

- с управлением по информационной политике, которое ответственно за публикацию проекта на официальном сайте органа исполнительной власти;
- с управлением контроля и документооборота, где проект проверяется на соответствие установленным нормам для составления проектов документации;
- с правовым управлением, которое проводит анализ на соответствие нормативно-правовой базе;
- с первым заместителем главы администрации и курирующими заместителями главы администрации;
- с главой администрации муниципального образования для итогового согласования проекта программы (проекта внесения изменений в программу).

Согласованные муниципальные программы отдаются на исполнение ответственному исполнителю. Для контроля за исполнением муниципальной программы в отчетные периоды (1 квартал, 1 полугодие, 9 месяцев, год) проводится мониторинг. С этой целью у исполнителей собирается и анализируется информация по выполнению показателей муниципальной программы. В результате анализа выполнения муниципальной программы составляется отчет, который позволяет оценить ее эффективность и принять решение о ее дальнейшем развитии.

Процессы разработки, согласования, мониторинга и анализа муниципальной программы в администрации муниципального образования «Город Астрахань» не автоматизированы, что приводит к ошибкам, неточностям и значительным затратам времени на дополнительные проверки и согласование проектов.

Постановка задачи по разработке информационной системы. В результате исследования была разработана диаграмма вариантов использования, демонстрирующая функциональные требования к системе (рис. 3). Назначение системы заключается в том, что для формирования (создания) проекта и последующего сопровождения муниципальной программы необходим следующий набор функциональных требований:

- система должна обеспечивать возможность формировать муниципальные программы;
- система должна позволять согласовывать муниципальные программы;
- система должна обеспечивать возможность мониторинга реализации муниципальной программы;
- система должна рассчитывать коэффициенты эффективности муниципальной программы;
- система должна формировать отчеты и предоставлять информацию:
 - а) об исполнителях и соисполнителях программы;
 - б) о проекте и его реализации.

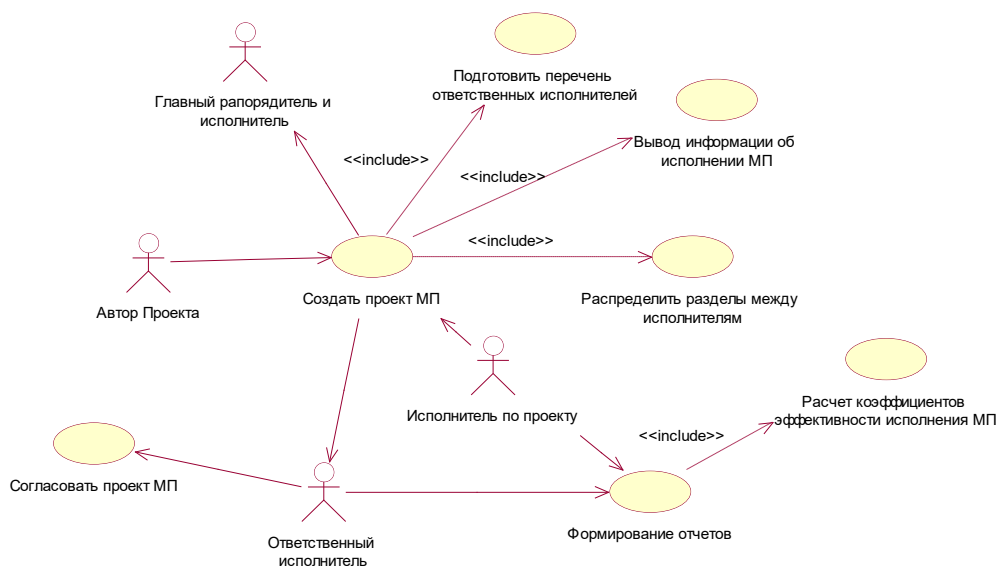


Рисунок 4 – Диаграмма вариантов использования

Диаграмма вариантов использования задает формат, в котором все эти важные факторы учтены и описаны [4].

Реализация системы. Алгоритм работы информационной системы следующий:

- 1) через систему подготавливаются и согласовываются муниципальные программы;
- 2) осуществляется мониторинг и проверка отчета по исполнению муниципальной программы;
- 3) рассчитываются показатели (с помощью фактических значений индикаторов);
- 4) формируются отчеты (с учетом показателей эффективности).

Для подготовки и согласования программы:

- 1) определяются цели реализации муниципальной программы и характеризующие ее показатели;
- 2) автор проекта муниципальной программы в соответствии с целями определяет этапы реализации программы и источники ее финансирования;
- 3) для разделов программы назначаются исполнители. При этом исполнители могут быть подобраны вручную или в автоматическом режиме с учетом их занятости и области компетенций;
- 4) формируется паспорт муниципальной программы со всеми необходимыми приложениями;
- 5) осуществляется согласование муниципальной программы в соответствии с настроенным маршрутом;
- 6) согласованная муниципальная программа выводится на печать.

Одной из наиболее важных задач данного этапа работы системы является постановка целей и показателей муниципальной программы. Для решения этой задачи авторами предлагается использовать сбалансированную систему показателей (ССП, Balanced Scorecard, BSC). Концепция данного подхода заключается в том, что определяются цели в разрезе нескольких проекций:

- финансы;
- клиенты;
- внутренние бизнес-процессы;
- обучение и развитие.

Между целями задаются взаимосвязи, отражающие влияние достижения одной цели на другую. Также для целей должны быть заданы показатели, которые позволяют осуществлять мониторинг степени реализации цели.

Наглядно результаты такого исследования задачи можно увидеть на стратегической карте. Пример такой стратегической карты для муниципального образования приведен на рисунке 5.

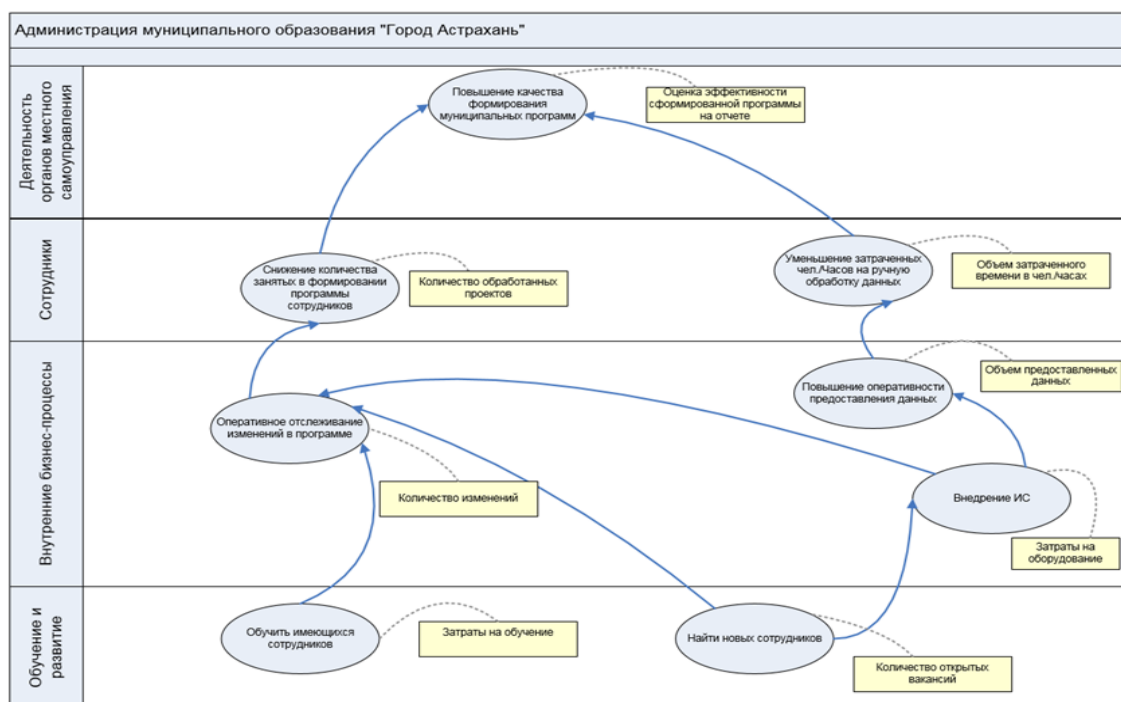


Рисунок 5 – Стратегическая карта муниципального образования

Применение системы сбалансированных показателей при постановке целей для муниципальных образований позволит обеспечить более обоснованный выбор целей и индикаторов их достижения по сравнению с традиционным подходом к целеполаганию.

Для мониторинга муниципальной программы:

- 1) в систему загружается отчет об исполнении муниципальной программы;
- 2) система распознает результаты выполнения программы и сохраняет их в базу данных;
- 3) определяются отклонения ожидаемых от фактических значений показателей;
- 4) формируется отчет, в котором помечаются цветом те показатели, по которым наблюдаются отклонения;
- 5) ответственный исполнитель указывает резюме по программе.

Для оценки эффективности программы в системе рассчитываются коэффициенты:

1. Коэффициент выполнения задач:

$$K_z = \frac{K_z^v}{Z},$$

где K_z^v – количество выполненных задач из программы; Z – общее число задач в программе.

2. Коэффициент расходов:

$$K_r = \frac{K_r^p}{D},$$

где K_r^p – сумма фактических расходов по программе; D – размер ассигнований на задачи программы.

3. Коэффициент эффективности расходов:

$$K_{er} = \frac{K_z}{K_r},$$

где K_z – коэффициент выполнения задач; K_r – коэффициент расходов.

4. Коэффициент реализации показателя:

$$K_p = \frac{F_p}{C_p},$$

где F_p – фактическое значение показателя программы; C_p – целевое значение показателя программы.

5. Коэффициент реализации программы:

$$K_{pr} = \frac{\sum_{p=1}^P K_p}{P},$$

где K_p – коэффициент реализации показателя; P – количество показателей программы.

6. Коэффициент эффективности выполнения задач:

$$K_{ez} = K_z \times K_{er},$$

где K_z – коэффициент выполнения задач; K_{er} – коэффициент эффективности расходов.

7. Коэффициент эффективности выполнения программы:

$$K_{ep} = 0,5 \times K_{pr} + 0,5 \times \sum_{z=1}^Z K_{ez} \times V_z,$$

где K_{pr} – коэффициент реализации программы; K_{ez} – коэффициент эффективности выполнения задач; Z – общее число задач в программе; V_z – вес задачи z , определяемый по формуле:

$$V_z = \frac{K_z^z}{D},$$

где K_z^z – сумма фактических расходов по программе на задачу z ; D – размер ассигнований на задачи программы.

На любом этапе работы с системой предусмотрена возможность формирования отчетов, отражающих срез знаний о реализации как отдельных программ, так и сводных данных по всем действующим муниципальным программам.

Для реализации задачи по составлению муниципальных программ была разработана структура базы данных, содержащая справочные данные, сведения о муниципальных программах, их согласовании и выполнении. Фрагмент разработанной структуры приведен на диаграмме сущность-связь (рис. 5).

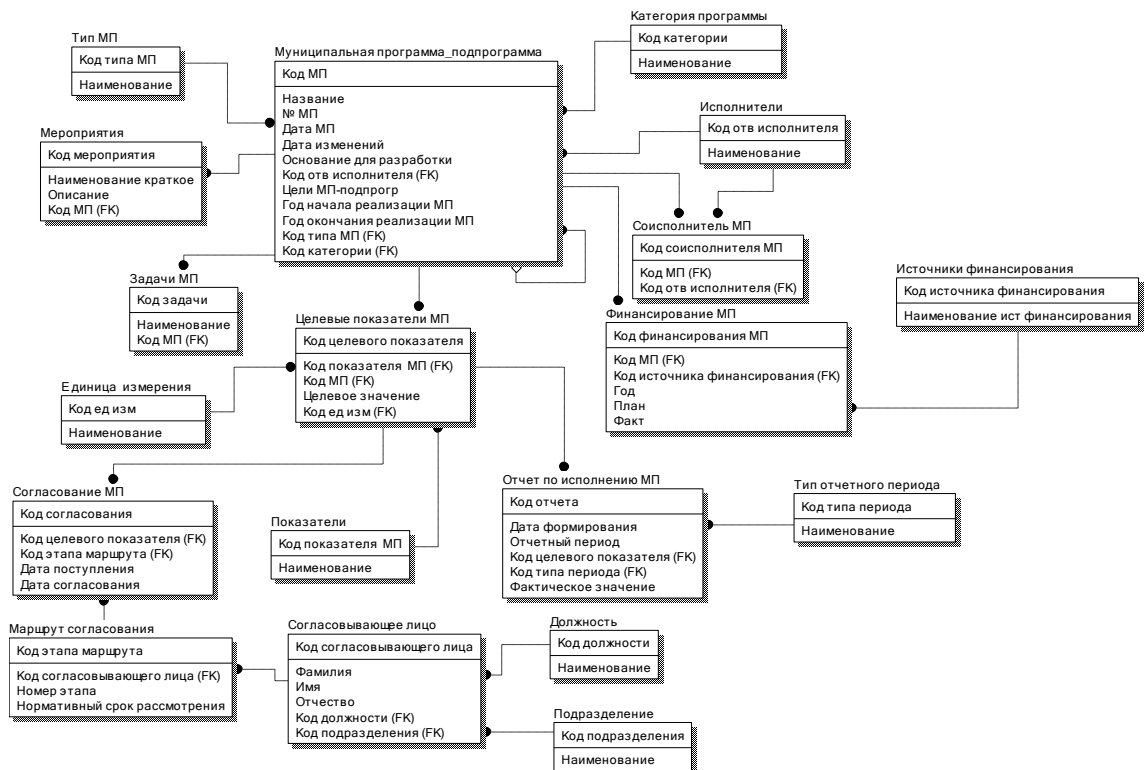


Рисунок 5 – Диаграмма сущность-связь информационной системы

Разработанная модель структуры базы данных:

- дает возможность определить все информационные объекты, которыми оперирует организация в своей деятельности;
- позволяет точно установить распределение ресурсов между этапами процесса, что дает возможность провести оценку эффективности использования ресурсов.

Заключение. Описанный проект информационной системы в настоящее время находится на стадии разработки. Информационную систему планируется внедрить в Администрацию муниципального образования «Город Астрахань» и в перспективе дополнить и интегрировать с подсистемой для сбора и анализа обращений граждан для выявления ключевых проблем, которые могут быть решены на стратегическом уровне при программно-целевом планировании.

Применение информационной системы для формирования муниципальных программ даст возможность принимать во внимание большое количество факторов и оптимизировать их влияние, что в большей степени позволит муниципальным программам отражать приоритеты политики в конкретных сферах деятельности администрации города.

Опыт использования данной системы может быть также применен для разработки и развития систем других муниципальных образований Российской Федерации.

Библиографический список

1. Райзберг, Б. А. Программно-целевое планирование и управление : учебное пособие для вузов / Б. А. Райзберг, А. Г. Лобко. – Москва : Инфра-М, 2007.
2. Рапопорт, В. С. Объективные предпосылки и основные положения целевого управления : учебное пособие / В. С. Рапопорт, Л. В. Родионова. – Москва : Мысль, 2008.
3. Руднева, Е. В. Целевые комплексные программы: организационно-экономический механизм: учебное пособие для вузов / Е. В. Руднева. – Москва : Наука, – 2007.
4. Скульский, Д. В. Исследование и проектирование информационной системы формирования муниципальных программ / Д. В. Скульский // Сборник материалов 69-й Международной студенческой научно-технической конференции, Астрахань, 15–19 апреля 2019 года. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2019.
5. Маклаков, С. В. BPwin и ERwin: CASE-средства для разработки информационных систем / С. В. Маклаков. – Москва : Диалог-МИФИ, 2001. – С.304.
6. Перлова, О. Н. Проектирование и разработка информационных систем : учебник / О. Н. Перлова, О. П. Ляпина, А. В. Гусева. – Москва : Academia, 2017. – 416 с.
7. Черемных, С. В. Структурный анализ систем: IDEF-технологии / С. В. Черемных. – Москва : Финансы и статистика, 2001. – С. 208.
8. Казанский, Ю. Н. Опыт организации и управления строительными фирмами США / Ю. Н. Казанский. – Москва : Стройиздат, 1985. – С. 8–10.
9. Кривошеева, М. Ю. Стратегия социально-экономического развития регионов на основе программно-целевых методов управления (на примере Воронежской области) : автореф. дис. ... канд. экон. наук / М. Ю. Кривошеева. – Воронеж, 2003. – С. 6.
10. Райзберг, Б. А. Государственное управление экономическими и социальными процессами : учеб. пособие / Б. А. Райзберг. – Москва : ИНФРА-М, 2010. – 384 с.

References

1. Raizberg, B.A., Lobko A. G. *Programmno-tselevoye planirovaniye i upravleniye : uchebnoye posobie dlya vuzov* [Program-targeted planning and management: textbook for universities]. Moscow, Infra-M Publ., 2007.
2. Rapoport, V. S., Rodionova, L. V. *Obektivnyye predposylki i osnovnyye polozheniya tselevogo upravleniya : uchebnoye posobie* [Objective prerequisites and main provisions of target management : textbook]. Moscow, Mysl Publ., 2008.
3. Rudneva, E. V. *Tselevyye kompleksnyye programmy: organizatsionno ekonomicheskiy mekhanizm : uchebnoye posobie dlya vuzov* [Target complex programs: organizational and economic mechanism: a textbook for universities]. Moscow, Nauka Publ., 2007.
4. Skulskiy, D. V. *Issledovanie i proektirovaniye informatsionnoy sistemy formirovaniya municipalnykh programm* [Research and design of an information system for the formation of municipal programs]. *Sbornik materialov 69-y Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Collection of Materials of the 69th International Student Scientific and Technical Conference], Astrakhan, April 15–19, 2019. Astrakhan, ASTU Publishing House, 2019.
5. Maklakov, S. V. *BPwin i ERwin: CASE-sredstva dlya razrabotki informatsionnykh sistem* [BPwin and ERwin: CASE tools for developing information systems]. Moscow, Dialogue-MEPH Publ., 2001, p. 304.
6. Perlova, O. N., Lyapina, O. P., Gusev, A. V. *Proektirovaniye i razrabotka informatsionnykh sistem : uchebnyk* [Design and development of information systems : textbook]. Moscow, Academia Publ., 2017. 416 p.
7. Cheremnykh, S. V. *Strukturnyy analiz sistem: IDEF-tekhnologii* [Structural analysis of systems: IDEF-technologies]. Moscow, Financy and statistica Publ., 2001, p. 208.
8. Kazanskiy, Yu. N. *Opyt organizatsii i upravleniya stroitelnyimi firmami SShA* [Experience in organizing and managing US construction companies]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985, pp. 8–10.
9. Krivosheeva, M. Yu. *Strategiya socialno-ekonomicheskogo razvitiya regionov na osnove programmno-tselevykh metodov upravleniya (na primere Voronezhskoy oblasti)* [The strategy of socio-economic development of regions based on program-target management methods (on the example of the Voronezh region)]. Voronezh, 2003, p. 6.
10. Raizberg B. A. *Gosudarstvennoye upravleniye ekonomicheskimi i socialnymi protsessami : uchebnoye posobie* [State management of economic and social processes : textbook]. Moscow, INFRA-M Publ., 2010. 384 p.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 004.021, 004.043, 004.4

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И МЕТОДА ТРАНСФОРМАЦИИ ЗАПИСИ АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ

Статья поступила в редакцию 02.05.2022, в окончательном варианте – 16.05.2022.

Смирнова Юлия Александровна, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

старший преподаватель кафедры информационной безопасности и цифровых технологий, ORCID: 0000-0002-3807-5062, e-mail: yuliya_smirnova_2048@mail.ru

Головатская Леся Ивановна, Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф.М. Апраксина – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», 414000, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Никольская, 6,

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры математических и естественнонаучных дисциплин, ORCID: 0000-0002-7181-2845, e-mail: lesy_g@mail.ru

В статье описывается алгоритм и метод трансформации записи атомно-молекулярных систем. Приведен перечень различных форм записей, проведен анализ структуры записей и актуализирован процесс разработки программы для конвертации Z-матриц в различные форматы и формы записи данных в файл. В процессе работы рассматриваются и используются форматы данных в квантово-химических программах: Gaussian, GAMESS, MOPAC. В результате исследования получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Программа может использоваться в учебном процессе на кафедрах химии, биологии, а также для лаборатории математического моделирования в химических областях. Функциональные возможности: программа осуществляет связь между квантово-химическими программами. Например, MOPAC помогает нарисовать молекулу и выгрузить данные её построения. На основе данных программа формирует Z-матрицу внутренних координат и записывает её в текстовый файл .txt, в котором уже задан код запуска расчета устойчивой структуры в GAMESS. Рассмотренный подход позволяет повысить эффективность в создании записей атомно-молекулярных систем, проведении сравнительных и научных квантово-химических вычислений, сокращает время на определение устойчивой структуры молекулярных компонентов и получение готовой Z-матрицы.

Ключевые слова: алгоритм, атомно-молекулярные системы, Gaussian, GAMESS, MOPAC, трансформация, конвертация

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM AND METHOD OF RECORD TRANSFORMATION OF ATOMIC AND MOLECULAR SYSTEMS

The article was submitted to the editorial office 02.05.2022, in the final version – 16.05.2022.

Smirnova Yulia A., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, Senior Lecturer, Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID: 0000-0002-3807-5062, e-mail: yuliya_smirnova_2048@mail.ru

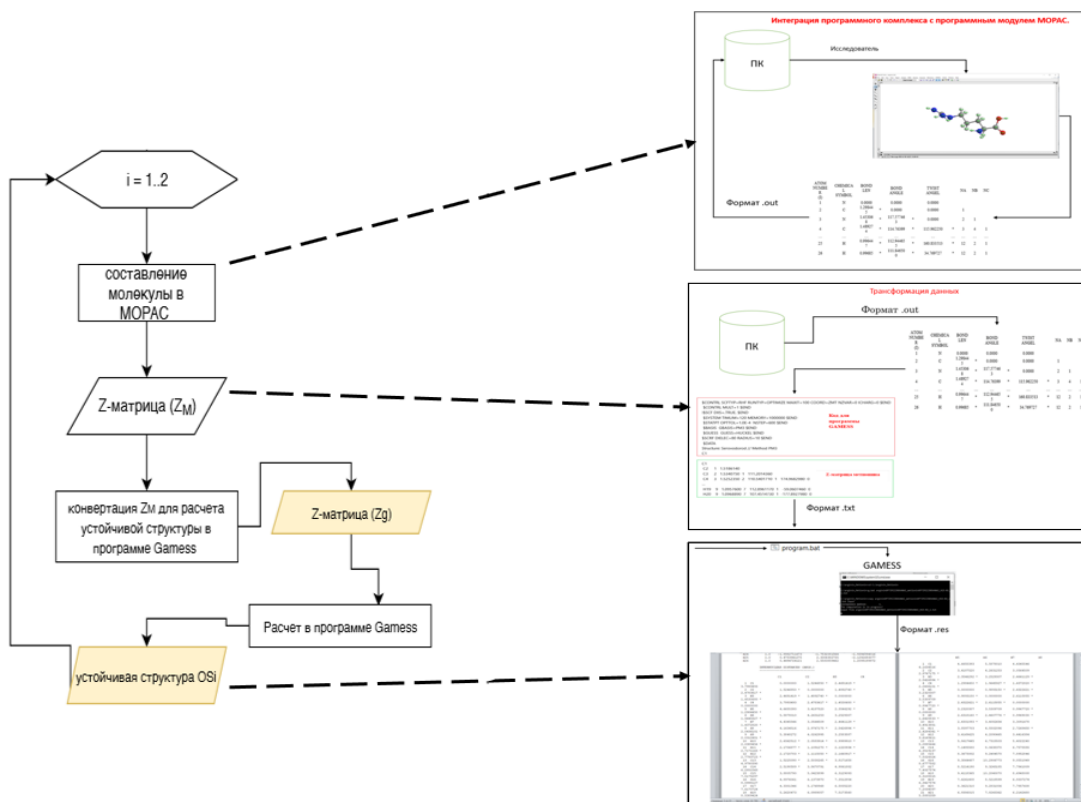
Golovatskaya Lesya I., Caspian Institute of Sea and River Transport named after general-admiral F.M. Apraksin – branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volga State University of Water Transport", 6 Nikolskaya St., Astrakhan, 414000, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of Mathematical and Natural Sciences Department, ORCID: 0000-0002-7181-2845, e-mail: lesy_g@mail.ru

The article describes algorithm and method of transformation of atomic-molecular systems records. The list of different record forms is given, the analysis of record structure is carried out and the process of program development for conversion of Z-matrices into different formats and forms of data records in a file is actualized. In the process, the data formats in quantum-chemical programs are reviewed and used: Gaussian, GAMESS, MOPAC. As a result of the research, a certificate of registration of a computer program was obtained. The program can be used in the educational process at the departments of chemistry, biology, as well as for the laboratory of mathematical modeling in chemical areas. Functionality: the program makes a link between quantum-chemical programs. For example, MOPAC helps to draw a molecule and to upload its construction data. On the basis of the data the program forms Z-matrix of internal coordinates and writes it in a text file .txt, in which the code of start of calculation of stable structure in GAMESS is already set. The considered approach allows to increase efficiency in creation of records of atomic-molecular systems, to carry out comparative and scientific quantum-chemical calculations, to reduce time for definition of stable structure of molecular components and to receive ready Z-matrix.

Keywords: algorithm, atomic-molecular systems, Gaussian, GAMESS, MOPAC, transformation, conversion

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Изучение веществ на атомном уровне в настоящее время широко развивается, что подтверждает ряд работ в данном направлении в различных областях науки [1–5]. Такое изучение не может проходить без молекулярного моделирования, часто называемого атомистическим моделированием. Опыт моделирования каких-либо процессов предполагает необходимость использования различных программных инструментов [6–7]. Каждый программный продукт использует свои шаблоны во входных и выходных документах. Так, например, в биохимии и биоинформатике существуют различные способы описания структуры молекулы. Каждое описание может отличаться в различных программах.

Например, одним из самых распространённых способов атомной структуры молекулы является создание модели молекулы в виде молекулярного графа. Молекулярный граф представляет собой связный неориентированный граф, находящийся во взаимно-однозначном соответствии со структурной формулой химического соединения таким образом, что вершинам графа соответствуют атомы молекулы, а рёбрам графа – химические связи между этими атомами. Понятие «молекулярный граф» является базовым для химии.

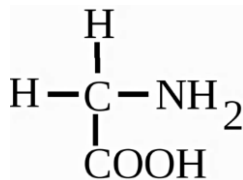


Рисунок 1 – Молекулярный граф молекулы «Глицин»

На основе молекулярного графа осуществляется описание атомно-молекулярной системы (АМС) молекулы.

Для описания атомно-молекулярных систем существует несколько способов описания координат, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки [8]:

1) декартовы координаты. Декартовы координаты – это пространственные координаты в выбранной пользователем декартовой системе координат, дополненные информацией о типе атома (типе химического элемента);

2) внутренние координаты;

3) координаты Z-матрицы. Z-матрица – это описание атомных координат в виде n записей (для каждого атома i в данной n-атомной системе);

4) дробные координаты.

Описание метода. Для данной работы было принято решение использовать описание АМС способом Z-матрицы. Он является наиболее распространённым и описывает молекулу с помощью координат молекулярной n-атомной системы (рис. 2). В качестве недостатка описания молекулярной структуры таким способом можно выделить различие в формах записи для разных программ.

Основные компоненты Z-матрицы (для каждого i атома в данной n-атомной системе):

Z_i, Z_a, Z_b, Z_c – тип атома (имя химического элемента);

i, a, b, c – порядковые номера;

$R_{z_i z_a}$ – межатомное расстояние между атомами Z_i и Z_a ;

$\alpha_{z_i z_a z_b}$ – валентный угол, образуемый между атомами Z_i и Z_a, Z_b ;

$\phi_{z_i z_a z_b z_c}$ – двугранный угол, образованный атомом Z_i и плоскостью Z_a, Z_b, Z_c .

Каждому атому присваивается порядковый номер в данной n-атомной системе. Порядок описания атома i следующий:

$$\begin{cases} i > a \\ i > b. \\ i > c \end{cases} \quad (1)$$

Как видно из системы, порядковый номер «i» должен быть больше, чем номера атомов, используемых при построении.

Рассмотрим различные формы описания атомно-молекулярных систем в декартовых координатах в существующих программных комплексах:

1. Структура Z-матрицы в программе Gaussian [9].

Для того чтобы описать АМС любой молекулы, нужно задать её Z-матрицу. Например, для молекулы глицина в программе Gaussian, она будет выглядеть следующим образом:

```
C1
N2 C1 1.478822
C3 C1 1.521151 N2 110.304468
O4 C3 1.349162 C1 122.356739 N2 44.893266
O5 C3 1.213291 C1 126.358351 N2 -136.899826
H6 C1 1.111253 C2 113.633806 C3 -123.284684
H7 C1 1.109335 C2 108.691187 C3 118.707537
H8 N2 0.997497 C1 109.293714 C3 -168.846241
H9 N2 0.998174 C1 109.779802 C3 71.284892
H10 O4 0.949798 C3 110.655947 C1 -4.353087
```

Рисунок 2 – Z-матрица глицина в программе Gaussian

Таким образом, структурная формула описания АМС Z-матрицы программы Gaussian имеет вид:

$$Z_i i \ Z_a a \ R_{z_i z_a} \ Z_b b \ \alpha_{z_i z_a z_b} \ Z_c c \ \phi_{z_i z_a z_b z_c} \quad (2)$$

2. Структура Z-матрицы в программе МОРАС [10].

Для того чтобы описать АМС любой молекулы, нужно задать её Z-матрицу. Например, для молекулы глицина в программе МОРАС она будет выглядеть следующим образом:

АТОМ NUMBER (I)	CHEMICAL SYMBOL	BOND LENGTH (ANGSTROMS) NA:I	BOND ANGLE (DEGREES) NB:NA:I	TWIST ANGLE (DEGREES) NC:NB:NA:I	NA	NB	NC
1	C	0.000000	0.000000	0.000000			
2	N	1.478822	* 0.000000	0.000000	1		
3	C	1.521151	* 110.304468	* 0.000000	1	2	
4	O	1.349162	* 122.356739	* 44.893266	* 3	1	2
5	O	1.213291	* 126.358351	* -136.899826	* 3	1	2
6	H	1.111253	* 113.633806	* -123.284684	* 1	2	3
7	H	1.109335	* 108.691187	* 118.707537	* 1	2	3
8	H	0.997497	* 109.293714	* -168.846241	* 2	1	3
9	H	0.998174	* 109.779802	* 71.284892	* 2	1	3
10	H	0.949798	* 110.655947	* -4.353087	* 4	3	1

Рисунок 3 – Z-матрица ГЛИЦИНА в программе МОРАС

Таким образом, структурная формула ОАМС Z-матрицы программы МОРАС имеет вид:

$$i \ Z_i \ R_{z_i z_a} \ \alpha_{z_i z_a z_b} \ \phi_{z_i z_a z_b z_c} \ a \ b \ c \quad (3)$$

3. Структура Z-матрицы в программе GAMESS [11].

Для того чтобы описать АМС любой молекулы, нужно задать её Z-матрицу. Например, для молекулы глицина в программе GAMESS она будет выглядеть:

```

C1
C2      1  1.5148310
O3      2  1.3546590  1  115.3041040
O4      2  1.2159740  1  128.6112280  3  178.2055680
N5      1  1.4780630  2  110.0320490  3  67.3430960
H6      1  1.1090210  2  109.3449650  3 -173.9632980
H7      1  1.1118310  2  108.6822480  3  -58.0395420
H8      3  0.9521880  2  109.9652470  1 -178.6727860
H9      5  0.9979500  1  110.2415640  2  -65.8273390
H10     5  0.9974120  1  108.9807090  2  174.0592730

```

Рисунок 4 – Z-матрица глицина в программе GAMESS

Таким образом, структурная формула описания АМС Z-матрицы программы GAMESS имеет вид:

$$Z_i \ i \ a \ R_{z_i z_a} \ b \ \alpha_{z_i z_b} \ c \ \varphi_{z_i z_c} \quad (4)$$

Алгоритм. Анализ различных форм описания Z-матриц позволит сделать вывод о необходимости создания алгоритма и метода трансформации записи атомно-молекулярных систем в различных вариациях.

Метод трансформации записи атомно-молекулярных систем условно делится на шесть основных этапов:

- 1) сбор данных;
- 2) преобразование;
- 3) анализ данных;
- 4) принятие решений и выполнение необходимых работ по результатам принятых решений;
- 5) обратная связь;
- 6) хранение.

Первый этап. Сбор данных.

Данные для трансформации Z-матрицы поступают в различных формах записи и из разных источников (файлы различного расширения): как внутренних (из базы данных), так и внешних.

Второй этап. Преобразование.

Таким образом, входные данные требуется конвертировать в нужный исследователю вид. Это может быть и тот же самый вид Z-матрицы, но тогда алгоритм проверяет её на правильность составления.

Алгоритм «Парсинг» файла Z-матрицы распisan по следующим шагам:

1. Начало.
2. На вход поступает файл с расширением (.out, .GJF, .res.).
3. Определяем записи по расширению поступившего файла:
 - 3.1. Если файл .out – это MORAC.
 - 3.2. Если файл .GJF – это Gaussian.
 - 3.3. Если файл .res – это GAMESS.
4. Анализ данных:
 - 4.1. Если файл расширения .out или .GJF, то:
 - 4.1.1. собираем данные описания атомно-молекулярной системы, добавляя их в двумерный массив;
 - 4.1.2. преобразуем данные массива, переставляя основные компоненты Z-матрицы к виду ОАМС программы GAMESS, согласно формуле (4).
 - 4.2. Если файл Z-матрицы имеет вид программы GAMESS, то переходим к 4 этапу (четвертый этап – принятие решений и выполнение необходимых работ по результатам принятых решений).
 - 4.3. Конец.

Третий этап. Анализ данных.

На этом этапе с использованием программы GAMESS происходит расчет устойчивой структуры. Программа GAMESS требует для своей работы файлы Z-матрицы, которые обычно имеют расширение *.txt. Файл состоит из нескольких частей: программной части и части с описанием Z-матрицы. Структура входного файла, подготовленного для расчета молекулы, приведена на рисунке 6.

```

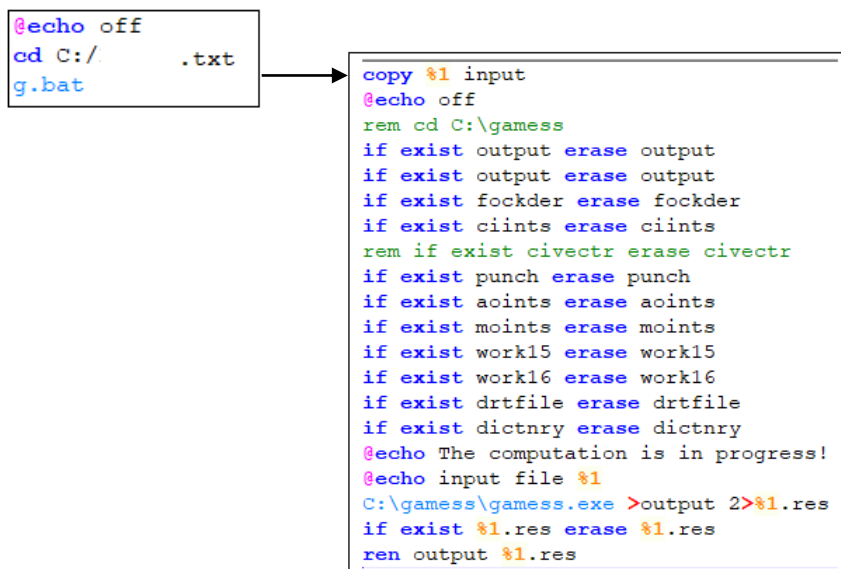
$CONTRL SCFTYP=RHF RUNTYP=OPTIMIZE MAXIT=100 COORD=ZMT NZVAR=0 ICHARG=0 $END
$CONTRL MULT=1 $END
!$SCF DIIS=.TRUE. $END
$SYSTEM TIMLIM=120 MEMORY=1000000 $END
$STATPT OPTTOL=1.0E-4 NSTEP=1800 $END
$BASIS GBASIS=PM3 $END
$GUESS GUESS=HUCKEL $END
$SCRF DIELEC=80 RADIUS=10 $END
$DATA
Structure: Glicin // Method PM3
C1
*****
*****
$END

```

Рисунок 5 – Структура входного файла, подготовленного для расчета молекулы

Алгоритм «Анализ данных» имеет следующее описание:

1. Начало.
2. На вход поступает файл расширения *.txt.
3. Создается пакетный файл с расширением .bat, в котором содержатся несколько команд для работы с программой GAMESS. Структура .bat файла представлена на рисунке 6.



```

@echo off
cd C:/      .txt
g.bat
copy %1 input
@echo off
rem cd C:\games
if exist output erase output
if exist output erase output
if exist fockder erase fockder
if exist ciints erase ciints
rem if exist civectr erase civectr
if exist punch erase punch
if exist aoints erase aoints
if exist moints erase moints
if exist work15 erase work15
if exist work16 erase work16
if exist drtfile erase drtfile
if exist dictnry erase dictnry
@echo The computation is in progress!
@echo input file %1
C:\games\games.exe >output 2>%1.res
if exist %1.res erase %1.res
ren output %1.res

```

Рисунок 6 – Пакетный файл с расширением .bat

4. Запускает только что созданный пакетный файл.
5. Осуществляет расчет Z-матрицы, используя программу GAMESS, и выдается обратная связь в виде OUTPUT файл с расширением .res.
6. Анализирует выходной файл программа GAMESS расширения *.res на наличие устойчивой структуры:

6.1. Если расчет прошел успешно, то из выходного документа выбираются данные оптимизированной Z-матрицы.

Оптимизация молекулярной геометрии [6] заключается в минимизации полной энергии молекулы E_{tot} при вариации координат атомов. Поскольку зависимость E_{tot} от координат ядер является поверхностью потенциальной энергии (ППЭ), оптимизация геометрии является поиском точек локальных минимумов.

6.2. Если расчет не прошел, то в созданном ОАМС содержатся ошибки.

7. Конец.

Четвертый этап. Обратная связь.

Из выходного документа формируется оптимизированная Z-матрица и на основе данных образуется двумерный массив. Далее компоненты массива сортируются к виду программы МОРАС согласно формуле (3) или Gaussian согласно формуле (2).

Пятый этап. Хранение.

Оптимизированная Z-матрица будет храниться вместе со всеми данными расчета и добавлена в базу знаний.

Блок-схема процесса работы программы представлена на рисунке 7.

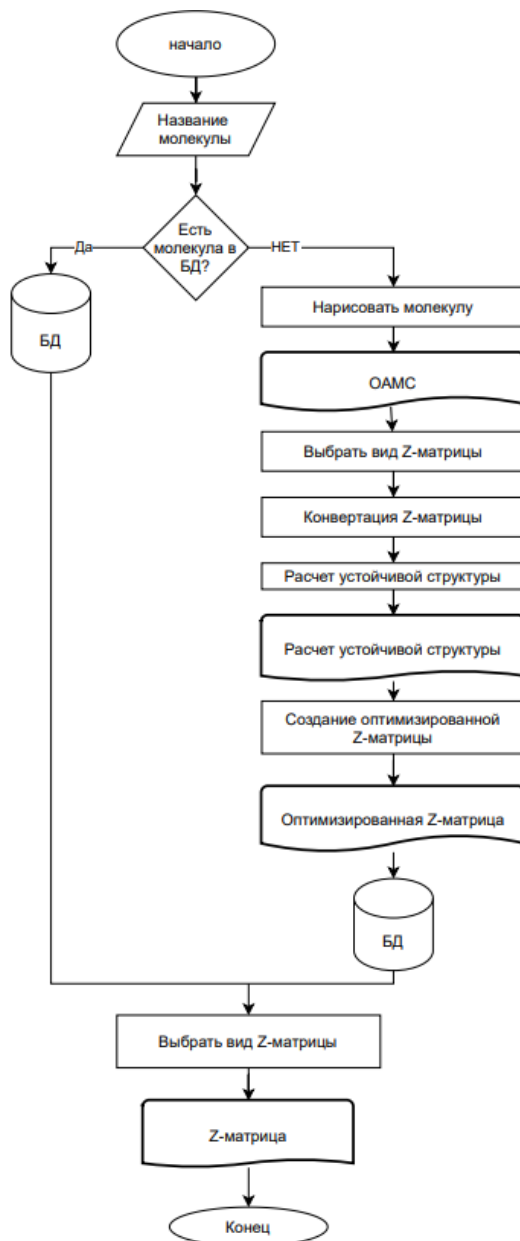


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма

Заключение. Рассмотренный подход позволяет повысить эффективность в создании записей атомно-молекулярных систем, проведении сравнительных и научных квантово-химических вычислений, сокращает время на определение устойчивой структуры молекулярных компонентов и получение готовой Z-матрицы. При создании метода используются специальные программы и дополнительные вычисления. В результате исследования был разработан специальный метод и алгоритмическое обеспечение для трансформации Z-матриц, а также получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [12].

Библиографический список

1. Аликберова, Л. Ю. Основы строения вещества : методическое пособие / Л. Ю. Аликберова, Е. В. Савинкина, М. Н. Давыдова. – Москва : МИТХТ, 2004. – Режим доступа: <http://alhimik.ru/stroenie>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

2. Тараскин, Д. В. Структура программного обеспечения для выявления потенциальных активных центров между двумя молекулами / Д. В. Тараскин, Л. И. Жарких // Вестник Технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 12. – С. 117–121.
3. Золотарева, Н. В. Основы квантовой механики в вопросах и задачах. Модельные примеры квантовой химии : учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по направлениям 04.05.01 – Фундаментальная и прикладная химия, 44.03.05 – Педагогическое образование, 04.03.01 – Химия. – Астрахань, 2020.
4. Жуков, С. С. Методические указания к лабораторным работам. Часть 1 «Основы квантово-химического анализа» / С. С. Жуков. – Волгоград 2017
5. Золотарева, Н. В. Численные методы анализа в химии : учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по химическим направлениям и педагогическим направлениям с двумя профилями подготовки очной и очно-заочной форм обучения / Н. В. Золотарева. – Астрахань, 2020.
6. Демидович, Н. А. Автоматизация обработки квантово-химических вычислений с использованием GAMESS / Н. А. Демидович // XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области : сборник материалов конференции. – Волгоград, 2022. – С. 165–167.
7. Budzelaar, P. H. M. Geometry optimization using generalized, chemically meaningful constraints / P. H. M. Budzelaar // Journal of Computational Chemistry. – 2007. – Т. 28, № 13. – С. 2226–2236.
8. Игнатов, С. К. Квантово-химическое моделирование атомно-молекулярных процессов : учебное пособие / С. К. Игнатов. – Нижний Новгород 2019. – 79 с.
9. Программа Gaussian. – Режим доступа: <https://gaussian.com>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
10. Программа MOPAC® – Режим доступа: <http://openmopac.net>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
11. Программа Gamess. The General Atomic and Molecular Electronic Structure System (GAMESS) is a general ab initio quantum chemistry package. – Режим доступа: www.msg.chem.iastate.edu/gamess/index.html, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
12. Программа для ЭВМ «TFinG» № 2022614450 от 22.03.22.

References

1. Alikberova, L. Yu., Savinkina, E. V., Davydova, M. N. *Osnovy stroeniya veshchestva : metodicheskoe posobie* [Fundamentals of substance structure : tutorial]. Moscow, 2004. Available at: <http://alhimik.ru/stroenie>.
2. Taraskin, D. V., Zharkikh, L. I. *Struktura programnogo obespecheniya dlya vyyavleniya potentsialnykh aktivnykh tse ntrov mezhdu dvumya molekulami* [Software structure for identifying potential active centers between two molecules]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik Technological University], 2019, vol. 22, no. 12, pp. 117–121.
3. Zolotareva, N. V. *Osnovy kvantovoy mekhaniki v voprosakh i zadachakh. Modelnye primery kvantovoy khimii : uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov, obuchayushchikhsya po napravleniyam 04.05.01 – Fundamentalnaya i prikladnaya khimiya, 44.03.05 – Pedagogicheskoe obrazovanie, 04.03.01 – Khimiya* [Fundamentals of Quantum Mechanics in questions and problems. model examples of quantum chemistry : textbook for students studying in the areas of 04.05.01 – Fundamental and Applied Chemistry, 44.03.05 – Pedagogical Education, 04.03.01 – Chemistry]. Astrakhan, 2020.
4. Zhukov, S. S. *Metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam. Chast 1 «Osnovy kvantovo-khimicheskogo analiza»* [Methodological instructions for laboratory works. Part 1 "Fundamentals of quantum-chemical analysis"]. Volgograd, 2017.
5. Zolotareva, N. V. *Chislennyye metody analiza v khimii : uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov, obuchayushchikhsya po khimicheskim napravleniyam i pedagogicheskim napravleniyam s dvumya profilyami podgotovki ochnoi i ochno-zaochnoy form obucheniya* [Numerical methods of analysis in chemistry : textbook for students studying in chemical directions and pedagogical directions with two training profiles of full-time and part-time forms of training]. Astrakhan, 2020.
6. Demidovich, N. A. *Avtomatizatsiya obrabotki kvantovo-khimicheskikh vychisleniy s ispolzovaniem GAMESS* [Automation of quantum-chemical calculations processing using GAMESS]. *XXVI Regionalnaya konferentsiya molodykh uchenykh i issledovateley Volgogradskoy oblasti : sbornik materialov konferentsii* [XXVI Regional Conference of young scientists and researchers of Volgograd region : collection of conference materials]. Volgograd, 2022, pp. 165–167.
7. Budzelaar, P. H. M. Geometry optimization using generalized, chemically meaningful constraints. *Journal of Computational Chemistry*, 2007, vol. 28, no. 13, pp. 2226–2236.
8. Ignatov, S. K. *Kvantovo-khimicheskoe modelirovanie atomno-molekulyarnykh protsessov : uchebnoe posobie* [Quantum-chemical modeling of atomic-molecular processes : textbook]. Nizhniy Novgorod, 2019. 79 p.
9. *Programma Gaussian* [Gaussian program]. Available at: <https://gaussian.com>.
10. *Programma MOPAC®* [MOPAC® program]. Available at: <http://openmopac.net>.
11. *Gamess program. The General Atomic and Molecular Electronic Structure System (GAMESS) is a general ab initio quantum chemistry package*. Available at: www.msg.chem.iastate.edu/gamess/index.html.
12. *Programma dlya EVM «TFinG»* [Computer program "TFinG"], no. 2022614450 of 22.03.22.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

DOI 10.54398/20741707_2022_2_68

УДК 004.42

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОУРОВНЕВОГО ПРОЦЕССОРНОГО КОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ WEBASSEMBLY

Статья поступила в редакцию 08.04.2022, в окончательном варианте – 26.04.2022.

Бородин Олег Валерьевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, магистрант, ORCID: 0000-0002-3769-0100, e-mail: oleg.borodin.1998@mail.ru

Егунув Виталий Алексеевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-9087-3275, e-mail: vegunov@mail.ru

Плотников Владислав Павлович, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, магистрант, ORCID: 0000-0002-1540-0512, e-mail: vladplotnikov34@gmail.com

В работе рассматривается WebAssembly – средство, которое позволяет с помощью языка JavaScript в современном браузере получать доступ к виртуальной стековой машине инструкций. Использование WebAssembly или WASM решает проблему исполнения браузерного кода на низком процессорном уровне, открывая доступ к возможностям таких языков, как C, C++, Rust и многие другие. Приводится ряд примеров, которые демонстрируют плюсы использования технологии. Рассматриваются несколько различных функций, анализируется их запуск как в стандартной JavaScript-реализации, так и с использованием WASM, анализируется полученное время исполнения, считается ускорение. Приводится обзор существующих решений, где в качестве альтернатив приводятся ранее актуальные в сообществе варианты решения проблемы низкоуровневого выполнения кода. На основе полученных практических результатов анализируются достоинства и недостатки технологии WebAssembly. Подводятся итоги, выделяются реальные сценарии использования технологии.

Ключевые слова: JavaScript, WASM, WebAssembly, Web Development, Loaded Background Calculations, JavaScript Performance, Processor Native Code

FEATURES OF USING LOW-LEVEL PROCESSOR CODE USING WEBASSEMBLY

The article was received by the editorial board on 08.04.2022, in the final version – 26.04.2022.

Borodin Oleg V., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

master student, ORCID: 0000-0002-3769-0100, e-mail: oleg.borodin.1998@mail.ru

Egunov Vitaly A. Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0001-9087-3275, e-mail: vegunov@mail.ru

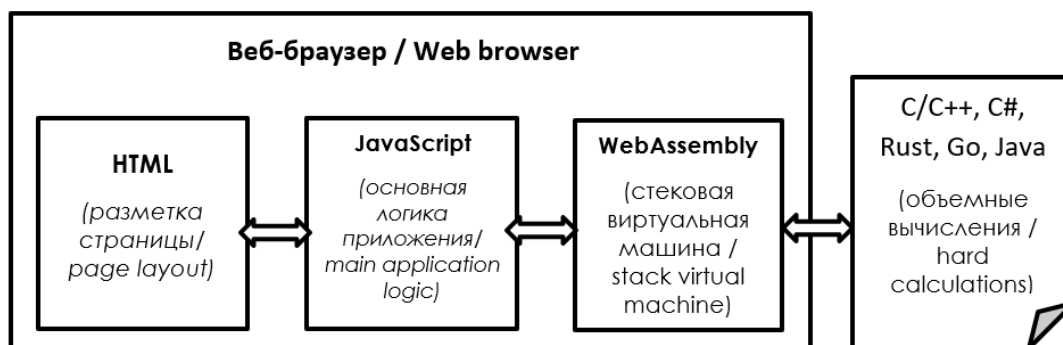
Plotnikov Vladislav P., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

master student, ORCID: 0000-0002-1540-0512, e-mail: vladplotnikov34@gmail.com

The paper considers WebAssembly, a tool that allows using the JavaScript language in a modern browser to access a virtual instruction stack machine. Using WebAssembly or WASM solves the problem of executing browser code at a low processor level, opening access to the capabilities of languages such as C, C++, Rust, and many others. A few examples are given that demonstrate the advantages of using the technology. Several different functions are considered, their launch is analyzed both in the standard JavaScript implementation and using WASM, the resulting execution time is analyzed, acceleration is considered. An overview of existing solutions is provided, where alternatives are previously relevant in the community solutions to the problem of low-level code execution. Based on the obtained practical results, the advantages, and disadvantages of the WebAssembly technology are analyzed. The results are summed up, the real scenarios of using the technology are highlighted.

Keywords: JavaScript, WASM, WebAssembly, Web Development, Loaded Background Calculations, JavaScript Performance, Processor Native Code

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Для веб-разработки, которая с каждым годом приобретает всё большую популярность и технологические новшества, остаётся актуальным по-прежнему один очень важный вопрос – быстрое исполнение кода в браузере. Современный браузер является мультиинструментом разработчика – он позволяет не только просматривать страницы, но и отлаживать код, следить за состоянием приложения, его ресурсами, сетью, безопасностью. Соответственно, нет сомнений в том, что множество улучшений в сфере веб-технологий может появиться и со стороны браузера, который уже давно функционально намного шире, чем многим кажется. Языком-монополистом в области веб-технологий и как минимум во всех популярных браузерах является JavaScript, то есть на данный момент все манипуляции вокруг веб-программирования по крайней мере на клиентской стороне будут опираться на данный язык.

JavaScript – это современный независимый язык, который обладает очень хорошей поддержкой со стороны разработчика, а также очень большим количеством активно используемых и развивающихся фреймворков и библиотек. Как известно, JavaScript изначально создавался как скриптовый язык, с помощью которого можно выполнять небольшие клиентские задачи в браузере, он не был приспособлен под быструю комплексную работу. Более того, JS однопоточен, хотя сейчас и есть некоторые способы, позволяющие частично обойти это ограничение. Конечно же, на основе этого нельзя сказать, что JavaScript неэффективен, но тем не менее у языка есть определенные внутренние ограничения и особенности, которые сильно ограничивают перспективы ускорения. Соответственно, было бы приоритетно то решение, которое имеет отличную совместимость с JavaScript, поскольку в современных условиях отказаться от него просто невозможно, но и между тем большую скорость исполнения.

Технология WebAssembly, о которой пойдет речь в данной работе, как раз является таким решением, она представлена новым форматом байт-кода, который доступен к исполнению во всех современных браузерах. Технология дает доступ к использованию в браузере таких языков, как C, C++, Rust и многих других, за счет сборки кода предварительно в набор низкоуровневых инструкций. Полученный формат является компактным, с одной стороны, при этом имеет производительность ближе к процессорной, нежели сам JavaScript. В то же время он также позволяет работать непосредственно и с JavaScript, который в данном случае обеспечивает передачу данных между браузером и WASM [1].

Так как на данный момент рассмотрение проблемы быстрого исполнения кода в браузере далеко не новое явление, то к решению проблемы также прилагаются некоторые сопутствующие требования, которые опираются на современное сообщество разработчиков:

- кроссплатформенность, поддержка мобильных устройств, нескольких операционных систем;
- скорость исполнения в пределах скорости машинного кода процессора, о чем упоминалось ранее;
- решение на базе самого браузера, то есть без установки;
- безопасность;
- удобство использования разработчика, инструменты отладки.

Таким образом, в данной работе будут рассмотрены имеющиеся способы и подходы в использовании машинного кода в веб-программировании, а также фактическом использовании других языков, отличных от JavaScript, для решения задач в среде веб-разработки. Результаты данного исследования могут быть использованы в качестве руководства для разработчиков, которые хотят ускорить ресурсоёмкие операции на клиенте, используя доступные и удобные средства. Ведь оптимизация на стороне клиента для конечного пользователя влечет за собой определенную выгоду использования – более быструю загрузку самого приложения, ускорение ряда операций, либо появление совершенно новой функциональности, которая доступна только за счет использования какого-то уникального API, доступного на базе совсем другого языка. Все перечисленные пункты чаще всего подразумевают сокращение времени ожидания клиента, а значит, улучшение опыта использования со стороны пользователя – соответственно, это подчеркивает необходимость проведения исследования

и его актуальность. Основной же задачей в данном случае является исследование способов применения, выявление достоинств и недостатков, а также использование современной технологии WebAssembly.

Обзор существующих решений. Ниже будет приведён перечень технологий, которые так или иначе применялись в решении поставленной проблемы частично или полностью. Для начала перечислим решения, которые уже не поддерживаются по тем или иным причинам, – это ActiveX, Adobe Flash, Microsoft Silverlight, Native Client и Portable Native Client.

ActiveX представляет собой фреймворк, определяющий программные компоненты, которые могут быть использованы и написаны на разных языках программирования. Приложение собирается из нескольких подобных компонентов и может использовать их функциональность.

В основе технологии лежит использование решений Microsoft, основывающихся на технологиях OLE (Object Linking and Embedding) и COM (Component Object Model), используемых для связывания и внедрения объектов в другие объекты и документы. Технология обеспечивает соединение между различными слоями приложения, что позволяет им вместе работать через Internet, а также иметь систему, которая направляет программный трафик.

В настоящее время ActiveX официально считается вредоносной из-за существенных проблем с безопасностью. Microsoft отказалась от поддержки ActiveX в Internet Explorer 10 и в Windows 8, а в 2015 г. поддержка ActiveX была полностью прекращена.

Adobe Flash – это платформа компании Adobe Systems, использовалась для создания веб-приложений. Получила широкое применение в разработке игр, анимации, рекламных баннеров, была одной из лидирующих технологий воспроизведения видео и аудио на веб-страницах. Среди основных серьезных недостатков можно отметить чрезмерную нагрузку на центральный процессор, связанную с невысокой эффективностью виртуальной машины Flash Player, а также рядом уязвимостей, одной из которых является угроза перехвата flash-приложением содержимого буфера обмена. В 2017 г. поддержка данного продукта была прекращена.

Microsoft Silverlight – программная платформа, использовавшаяся для написания и запуска многофункциональных интернет-приложений RIA. Она похожа на Adobe Flash, поскольку также имеет модуль для браузера, который использовался для демонстрации видео, воспроизведения аудио, показа анимации, работы с векторной графикой. Поддержка этой технологии окончательно прекратилась в 2015 г.

Native Client (NaCl) и Portable Native Client (PNaCl) – технология для запуска кода на платформах x86, x86-64, ARM и MIPS, позволяющая безопасно запускать машинный код непосредственно в браузере независимо от операционной системы. Эта технология также может быть использована для создания защищённых плагинов для браузера, частей какого-либо приложения либо самих приложений.

Помимо создания барьера против нежелательных побочных эффектов, модули NaCl переносимы как между операционными системами, так и между веб-браузерами и поддерживают функции, ориентированные на производительность, такие как инструкции по обработке потоков и векторизации, расширение набора инструкций, таких как SSE, а также использование встроенных функций компилятора и написанного вручную ассемблера.

При этом сами разработчики выделяли потенциально слабые с точки зрения безопасности системные компоненты технологии и сами это рассматривали [2]

- внутренняя песочница: бинарная проверка;
- внешняя песочница: перехват системных вызовов ОС;
- загрузчик бинарных модулей во время выполнения службы;
- сервисные интерфейсы трамплина во время выполнения;
- интерфейс связи IMC;
- интерфейс NPAPI.

Разработчики подробно рассматривали аспекты безопасности и внедряли различные механизмы, включающие уровни защиты на основе собственной уверенности в надежности различных компонентов и достижения наилучшего баланса между производительностью, гибкостью и безопасностью.

Но, несмотря на множественные усилия, технология не нашла поддержки других браузеров кроме Chrome, в итоге в 2017 г. Google объявила об отказе от PNaCl в пользу WebAssembly, на которой делается акцент в данной работе [3].

У всех вышеописанных решений были те или иные проблемы с безопасностью, либо же они не выдержали испытания временем и конкуренции. В современных условиях эти технологии не прижились, и их поддержка и развитие прекратились. Таким образом их можно разделить на две группы:

- выполнение родного кода прямо в браузере;
- исполнение кода в рамках виртуальной машины.

Примерами технологий из первой группы являются ActiveX, NaCl. К минусам здесь можно отнести отсутствие портируемости, потенциальные или подтвержденные проблемы с безопасностью.

Примерами технологий из второй группы являются Java Applets, Flash, Silverlight. Здесь к минусам можно отнести необходимость наличия плагина и/или специальной среды выполнения, другими словами, отсутствует возможность запуска сразу «из коробки»

Далее можно выделить более современное решение, которое в сравнении с рассмотренными ранее решениями делает уверенный шаг вперед – это asm.js. Asm.js является подмножеством JavaScript, с более высокой оптимизацией. При работе с asm.js вводятся определенные ограничения – только конструкции «if» и «while», данные только в числовом формате, то есть строки и объекты в использовании недоступны, функции только в именованном формате [4].

Скрипты, написанные на этом подмножестве, подлежат эффективной компиляции: типы данных переменных определяются статически с использованием вывода типов. Используется в основном в качестве промежуточного языка для компиляции с таких языков, как C/C++ и используется в связке с такими инструментами, как Emscripten или Mandreel.

Emscripten позволяет произвести оптимизацию кода и превратить его в asm.js-нотацию, одной из примечательных черт которой является наличие множества побитовых ИЛИ (табл. 1).

Таблица 1 – Представление кода на asm.js

C/C++	Asm.js
<pre>int add(int a, int b){ return a + b; }</pre>	<pre>function add(a, b){ return a 0 + b 0 }</pre>

Это побитовое ИЛИ делает кое-что интересное со значениями. В этом случае оно действует как неявное приведение числа с плавающей запятой к числу int. Можно ознакомиться с данным примером в консоли:

```
var x = 3.5 | 0
console.log(x) // 3
```

Если скомпилированный код asm.js выполняет некоторую визуализацию, то, скорее всего, он обрабатывается WebGL и визуализируется с использованием OpenGL. Таким образом, весь конвейер (рис. 1) технически использует JavaScript и браузер, но почти полностью обходит фактический, нормальный путь выполнения кода и рендеринга, который использует JavaScript на веб-странице [5].

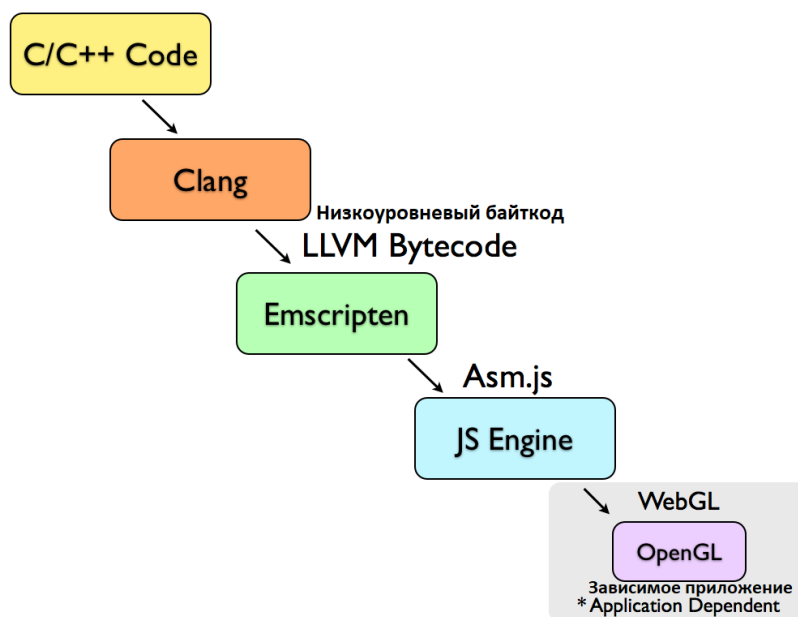


Рисунок 1 – Компиляция и исполнение asm.js

Как уже отмечено, asm.js – это подмножество JavaScript, которое сильно ограничено в том, что он может делать и как он может работать. Это сделано для того, чтобы скомпилированный код asm.js мог работать как можно быстрее, делая как можно меньше предположений, преобразуя код asm.js непосредственно в сборку. Вот основные моменты, которые позволяют asm.js быть быстрее и эффективнее JavaScript:

- asm.js отказывается от абстракций высокого уровня, таких как объекты JavaScript;
- asm.js не создает мусора, поэтому не нужно тратить время на сбор мусора;
- asm.js использует преимущества рабочих потоков, открывая более быстрый асинхронный код;
- asm.js позволяет использовать некоторые библиотеки C/C++, такие как OpenCV и Qhull.

Тем не менее, несмотря на все преимущества asm.js, в данной работе отдается большее предпочтение

в сторону WebAssembly, который детально рассматривается далее. Asm.js мог работать в основном с естественной скоростью, но на самом деле он никогда не работал стабильно во всех браузерах. Причина в том, что кто-то пытался оптимизировать его одним способом, кто-то – другим, с разными результатами. Со временем все стало сходиться, но основная проблема заключалась в том, что asm.js не был фактическим стандартом: это была неофициальная спецификация подмножества JavaScript, написанная одним поставщиком, которая лишь постепенно вызывала интерес и признание со стороны других.

WebAssembly, с другой стороны, был разработан совместно со всеми разработчиками основных браузеров. В отличие от JavaScript, который можно было сделать быстрым, только используя творческие методы, или asm.js, который можно было сделать быстрым, используя простые методы, хотя не все браузеры делают это, WebAssembly предоставляет более формальный подход к тому, как его оптимизировать [6].


Таким образом по рассмотренным решениям сформируем таблицу и добавим в нее непосредственно WebAssembly (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнение решений, решающих проблему браузерного эффективного исполнения кода

Технология	Годы поддержки	Языки	Архитектура	Платформа
ActiveX	1996–2015	C++, Delphi, Visual Basic, C#/VB.NET	Механизмы OLE и COM	Microsoft Windows, macOS, Solaris
Adobe Flash	1996–2017	<i>ActionScript</i>	Виртуальная машина, песочница	Microsoft Windows, Android, Linux, macOS, Solaris, BlackBerry OS
Microsoft Silverlight	2007–2015	C#, C++, JavaScript, Extensible Application Markup Language, Visual Basic	RIA (rich internet application), песочница	Microsoft Windows, macOS, Symbian OS
Native Client (NaCl) и Portable Native Client (PNaCl)	2011–2017	C, C++, JavaScript, Python, Ruby, Lua, Go	Песочница	Windows, Linux, macOS, Chrome OS
asm.js	2013 – наст. время	C, C++, JavaScript, Rust, Lua, Perl, Python, Ruby	Подмножество JavaScript, AOT (ahead-of-time) компиляция	Кроссплатформенное
WebAssembly	2017 – наст. время	C, C++, C#, JavaScript, Python, Go, Rust, Java, PHP, Lua, COBOL and other	Виртуальная машина, песочница	Кроссплатформенное

Основные особенности WebAssembly. WASM или WebAssembly – это бинарный формат, который совместим с браузером. Внутри технологии это – виртуальная машина, а на выходе – скомпилированное представление с поддерживаемого высокоуровневого языка. При этом WASM – не отдельный новый язык, а скорее инструмент. В качестве примера можно представить Java байт-код для виртуальной машины Java – это результат компиляции, то есть запускаемый блок кода (табл. 3). WASM-формат поставляется в браузер и там же обрабатывается, однако само исполнение формально осуществляется не браузером, а движком самого JavaScript. Отсюда же следует, чтоб браузер не единственный вариант использования, есть, например, среда NodeJS, которая служит чаще всего для реализации серверной составляющей приложений.

Таблица 3 – Информация о WebAssembly

WebAssembly		
бинарный формат: 	виртуальная машина: 	результат компиляции: (module (table \$table0 0 funcref) (memory \$memory (;0;) (export "memory") 1) (func \$fib (;0;) (export "fib") (param \$var0 i32) (result i32) (local \$var1 i32) block \$label0 local.get \$var0 ...)

Сильные стороны технологии, за счет которых она выигрывает у рассмотренных решений ранее, можно обобщить в 3 крупных пункта – актуальность, семантика и представление.

Под актуальностью можно понимать активное развитие технологии, высокое упоминание в сообществе разработчиков, более простую интеграцию с современными инструментами, множество доступных примеров и документации.

Под семантикой имеется в виду независимость от языка, платформы, аппаратной части, а также быстрое выполнение, безопасность и детерминированность.

Представление – отличный формат, который достаточно компактный, простой для генерации, быстрый при декодировании, быстрый при компиляции, подходит для потоковой передачи, а также допускает параллелизм.

WebAssembly отличен от JavaScript, но он не предназначен для замены, он используется для дополнения и работы вместе с JavaScript, позволяя веб-разработчикам использовать сильные стороны обоих языков.

JavaScript – это гибкий язык высокого уровня, достаточно выразительный для написания масштабируемых веб-приложений и не только, часто он используется в робототехнике, программировании различных плат, игровой индустрии и мобильной разработке. У него много преимуществ – он динамически типизируется и имеет огромную экосистему, которая предоставляет мощные фреймворки, библиотеки и другие инструменты [7].

WebAssembly – это низкоуровневый язык, похожий на ассемблер, с компактным двоичным форматом, который предоставляется языкам с низкоуровневыми моделями памяти, такими, как, например, C и Rust. Цель компиляции заключается в том, чтобы они могли работать в вебе, то есть структурно WASM можно представлять как связующую прослойку между такими языками и браузером. Также WebAssembly имеет высокоуровневую цель поддержки языков с моделями памяти со сборкой мусора в будущем [8].

В глобальном смысле WebAssembly – это виртуальная стековая машина с памятью, исполняющая инструкции. Простота данной концепции позволяет быть доступной ей для современного процессора. Схема взаимодействия браузера в качестве среды исполнения, канала сообщений представленного JavaScript и непосредственно формата WASM, полученного при компиляции из другого языка, представлена на рисунке 2.

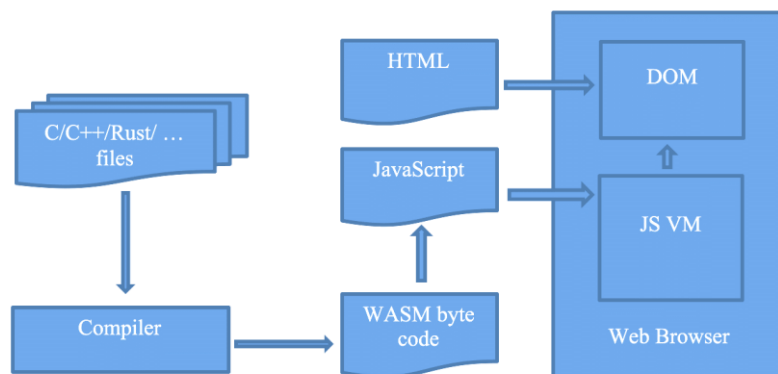


Рисунок 2 – Схема работы WebAssembly в браузере

Предлагаемые решения. В первую очередь ознакомиться с данной технологией можно с помощью простого онлайн-инструмента WasmFiddle, представленного на рисунке 3.

Интересовать здесь могут 4 области:

- в левом верхнем углу – исходный код на языке C;
- в левом нижнем углу – результат компиляции, доступный в нескольких форматах (текстовом, JavaScript-массиве чисел, Firefox x86-формате и др.);
- в правом верхнем – собранная и подготовленная к выполнению на JavaScript сборка;
- в правом нижнем – результат выполнения, вывод.

Для того чтобы опробовать WasmFiddle, будем использовать рекурсивную функцию расчёта n-го числа Фибоначчи:

```

int fibRecursive(int number) {
    if (number == 0) return 0;
    else {
        if ((number == 1) || (number == -1)) return 1;
        else {
            if (number > 0) return fibRecursive(number - 1) + fibRecursive(number - 2);
            else return fibRecursive(number + 2) - fibRecursive(number + 1);
        }
    }
}

```

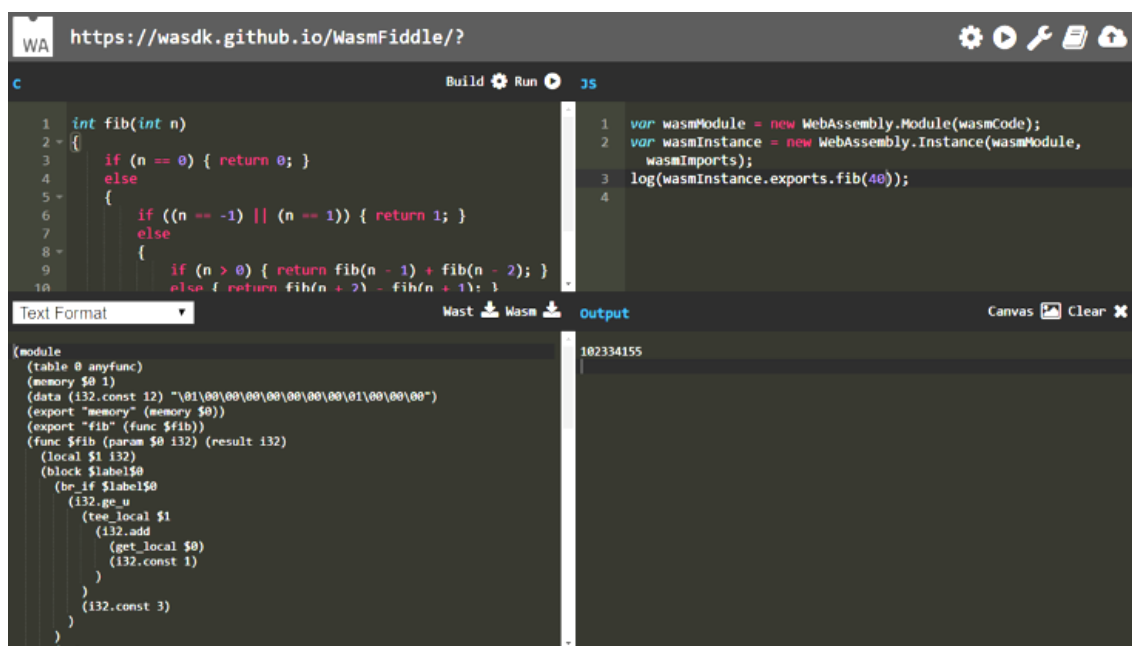


Рисунок 3 – Интерфейс WasmFiddle

На выходе компиляции результатом становится WASM-файл, его текстовое представление позволяет разобраться в том, что именно содержит сборка, какие таблицы, операции и код. С его помощью можно определять, что именно экспортируется наружу в виде таблицы памяти и функций. Также это представление используется для отладки (табл. 3). В готовом виде для использования в JavaScript-среде это будет выглядеть следующим образом (один из вариантов представления WASM):

```
const wasmCodeArray = new Uint8Array([0, 0, 1, 1, 11, 10, 7, 112, 7, 2, 11, 109, 114, 10, 0, 0, 1, 134, 128, 0, 10, 0, 96, 1, 11, 1, 127, 12, 127, 3, 13, 12, 128, 22, 10, 1 ... 0, 65, 12, 11, 12, 1, 11, 1, 11, 10, 10, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0]);
```

Здесь WASM описывается в виде массива чисел, но на практике WASM-файл будет значительно больше, и его загрузка должна быть выполнена соответствующим образом с какого-либо источника, например со стороны сервера.

Исполнение WebAssembly в браузере происходит следующим образом: браузер отрисовывает html-страницу в обычном режиме с привязанными к ней скриптами, которые, в свою очередь, уже выполняют загрузку и подготавливают к работе WebAssembly – получается особый модуль (WebAssembly module), а затем создаётся его экземпляр, после этих действий с его помощью можно вызывать доступные для экспорта функции [9].

```
const module = new WebAssembly.Module(wasmCodeArray);
const wasmInstance = new WebAssembly.Instance(module, []);
console.log(wasmInstance.exports.fibRecursive(12));
```

Данный способ подходит для понимания работы технологии, однако использовать такой подход в выпускаемом продукте нецелесообразно, и здесь становится актуален компилятор, например Emscripten. Это наиболее предпочтительный компилятор для работы с asm.js и WebAssembly при получении их из C/C++. Также существуют компиляторы и под другие языки, например Go, C#, Python, Rust, TypeScript и многие другие.

```
Компиляция в asm.js: > emcc -o1 fibRecursive.c -o fibRecursive.html
```

```
Компиляция в wasm: > emcc -o1 fibRecursive.c -o fibRecursive.html -s WASM=1
```

Установка Emscripten довольно проста – загрузка с официального сайта, распаковка файлов и выполнение нескольких консольных команд. После этого компилятор можно свободно использовать. В результате мы получаем html-файл с основной структурой, js-файл с набором общих сервисных функций и, конечно же, wasm-файл.

Emscripten успешно развивается и уже поддерживает ряд привлекательных возможностей, среди них:

- стандартные библиотеки для C и C++;
- OpenGL, EGL - 2D/3D-графика на основе WebGL;
- SDL 2 – различный ввод (клавиатура/мышь/джойстики), видео, звук;
- OpenAL – звук;
- эмуляция файловой системы (Emscripten File System Overview);
- EM_ASM("JS code") – исполнение JavaScript-кода, сформированного в виде строки [10].

Обзор нескольких видов программ. Для исследования скорости исполнения WASM-модулей будем использовать некоторые функции, написанные на языке C/C++ и собранные в качестве модулей WebAssembly с помощью WasmFiddle, рассмотренного ранее, и противопоставленные им функции на языке JavaScript.

Среди примеров кода представлены:

- рекурсивная функция расчёта n-го числа Фибоначчи, на примере которой была рассмотрена работа с WasmFiddle;

- итеративная реализация предыдущей функции:

```
function fibIter (number) {
  let a = 0; let b = 1;
  for (let i = 2; i <= number; i++) {
    let c = b;
    b = a + b;
    a = c;
  }
  return b;
}
```

- простая функция перемножения чисел:

```
function jsMultiplyInt(a, b, size) {
  let c = 1.0;
  for (let i = 0; i < size; i++) {
    c = c * a * b;
  }
  return c;
}
```

- простая функция перемножения векторов:

```
function jsMultiplyIntVec(src1, src2, res, size) {
  for (let i = 0; i < size; i++) {
    res[i] = src1[i] * src2[i];
  }
}
```

Сама процедура тестирования будет проходить с помощью специального скрипта, нацеленного на фиксирование времени исполнения стандартной функции, а затем функции уже в WASM-формате с последующим расчетом ускорения.

JavaScript-файл будет содержать помимо самих тестируемых функций ещё и логику самого тестирования. В специальном объекте storage по уникальным ключам будет храниться время исполнения той или иной функции:

```
const jsId = 'js';
const wasmId = 'wasm'
let storage = {};
storage[jsId] = 0;
storage[wasId] = 0;
```

Далее реализована функция, которая выполняет замер времени исполнения переданной в качестве аргумента функции и аргументов для неё, представленных массивом. Выглядит она следующим образом:

```
function execFunc(func, execFuncOptions) {
  const { arrArgs, funcCallCount } = execFuncOptions;
  func(...arrArgs); // warming up
  let elapsedTime = 0;
  for (let i = 0; i < funcCallCount; i++) {
    const start = performance.now();
    func(...arrArgs);
    const end = performance.now();
    elapsedTime += end - start;
  }
  return elapsedTime;
}
```

Здесь перед замером производится неучитываемый запуск вне цикла, для однозначного понимания работоспособности переданной функции, после производятся временные замеры с помощью специальной стандартной функции языка performance.now(), вычисляется разность между временной меткой до начала выполнения и временной меткой после выполнения вычислений, что как раз таки будет означать время исполнения самой функции, далее полученное время возвращается наружу.

Далее подготовим сами функции к тестированию и данные для них. Функция на JavaScript:

```
function jsMultiplyInt(a, b, n) {
  let c = 1.0;
  for (let i = 0; i < n; i++)
    c = c * a * b;
  return c;
}
```

И она же (в исходном виде на C), но только в виде WASM-модуля:

```
const wasmCodeArr = new Uint8Array([1, 1, 0, 97, 115, 109, 1, 0, 0, 0, 2, 2, 6, 100, 101, 109, 1, 136, 128,
128, 128, 127, ... 128, 0, 1, 0, 132, 2, 128, 128, 1, 128, 1, 0, 1, 112, 0, 0, 0, 11, 5, 131, 1, 2, 2, 65, 127, 106, 34,
10, 2, 13, 0, 11, 11, 10, 32, 3, 10, 21, 11]);
```

```
const wasmExportModule = new WebAssembly.Module(wasmCodeArr);
const wasmInstanceFunctions = new WebAssembly.Instance(wasmExportModule, []);
```

Данные для тестирования будем использовать следующие:

```
const num = 999999999;
```

```
const arr = [num, num, num];
```

Осуществим печать полученных функций в консоль:

```
const jsFunc = jsMultiplyInt;
```

```
const wasmFunc = wasmInstanceFunctions.exports.multiplyInt;
```

```
console.log(jsFunc);
```

```
console.log(wasmFunc);
```

И наконец реализация самой основной функции, test-запуск которой полностью производит нужный тест. Представлен будет основной фрагмент без промежуточных приготовлений:

```
setTimeout(() => {
  const wasmTime = execFunc(wasmFunc, execFuncOptionsWasm, wasmId);
  storage[wasmId] += wasmTime;
  setTimeout(() => {
    const jsTime = execFunc(jsFunc, execFuncOptionsJs, jsId);
    storage[jsId] += jsTime;
    const wasmAcceleration = jsTime / wasmTime;
    console.log(`WASM acceleration = (jsTime: ${jsTime} / wasmTime: ${wasmTime}) =
${wasmAcceleration}`);
    resetStorage(storage, jsId, wasmId);
  });
});
```

Здесь стоит коснуться основных моментов:

- каждый запуск execFunc с помощью setTimeout выносятся в независимый стек вызовов, то есть запуск производится в независимом пространстве, где основным вычислениям ничего мешать не будет;
- для корректной записи результатов используются ранее созданные идентификаторы jsId и wasmId, которые нужны для доступа к объекту storage;
- после вычислений производится расчет ускорения.

Результаты и замеры. Далее в уже рассмотренном формате произведём замеры для всех представленных ранее видов программ с помощью реализованного скрипта. Разница в тестах будет минимальная – обеспечить нужно будет лишь подачу различных аргументов на вход функциям.

Таблица 4 – Рекурсивная функция расчёта n-го числа Фибоначчи, количество запусков 10

N	JS, мс.	WASM, мс.	Ускорение
40	10106,2	5710,5	1,77
41	16361,3	9191,8	1,78
42	27074,2	15094,1	1,79
43	44069,4	24318,9	1,81
44	70758,5	38957,2	1,81

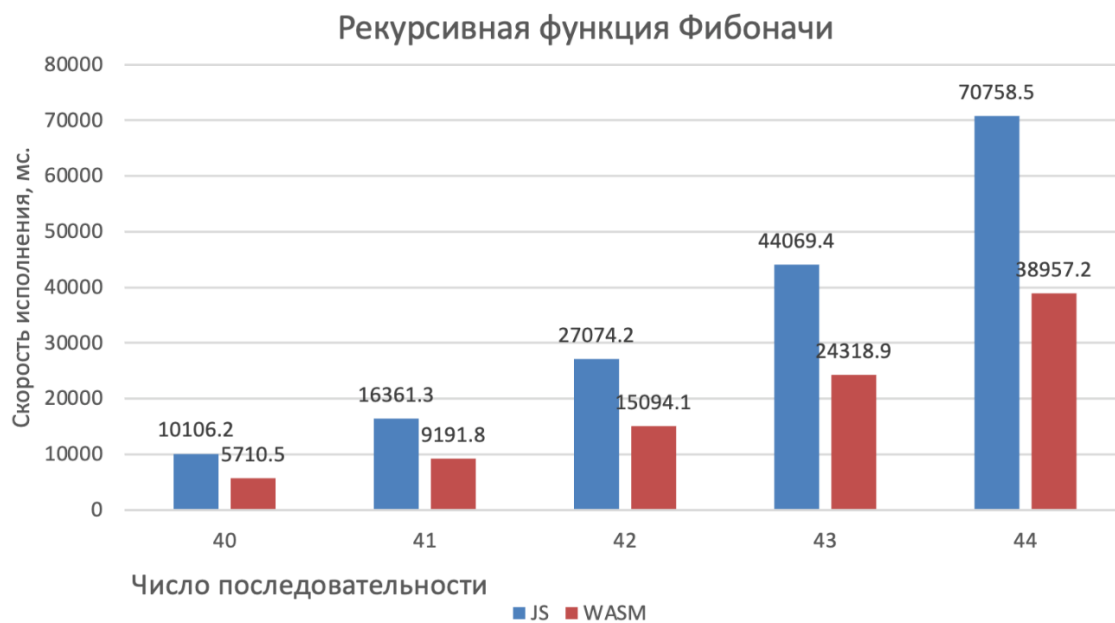


Рисунок 4 – Рекурсивная функция расчёта n-го числа Фибоначчи, количество запусков 10

Таблица 5 – Итеративная функция расчёта n-го числа Фибоначчи, количество запусков 1 000 000, диапазон значений 40–44

N	JS, мс.	WASM, мс.	Ускорение
40	468,9	454,0	1,03
41	477,3	441,0	1,08
42	466,89	434,0	1,07
43	468,4	479,2	0,98
44	471,0	446,1	1,05

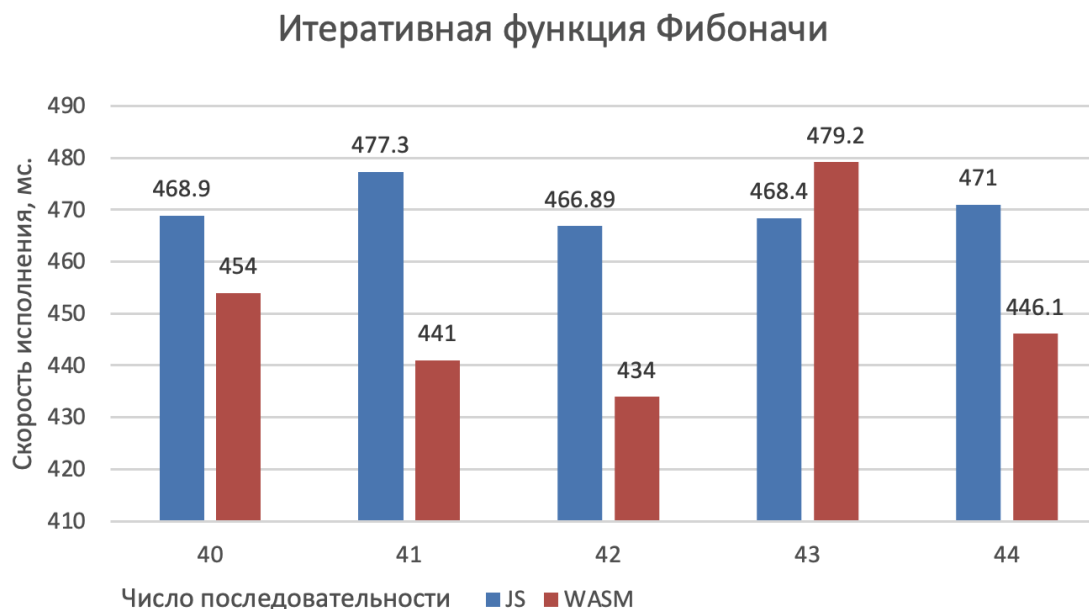


Рисунок 5 – Итеративная функция расчёта n-го числа Фибоначчи, количество запусков 1 000 000, диапазон значений 40–41

Таблица 6 – Итеративная функция расчёта n-го числа Фибоначчи, количество запусков 1 000 000, диапазон значений 100–500

N	JS, мс.	WASM, мс.	Ускорение
100	585,7	553,8	1,06
200	777,7	616,2	1,26
300	937	680,1	1,37
400	1087,8	745,2	1,46
500	1250,6	774,4	1,61

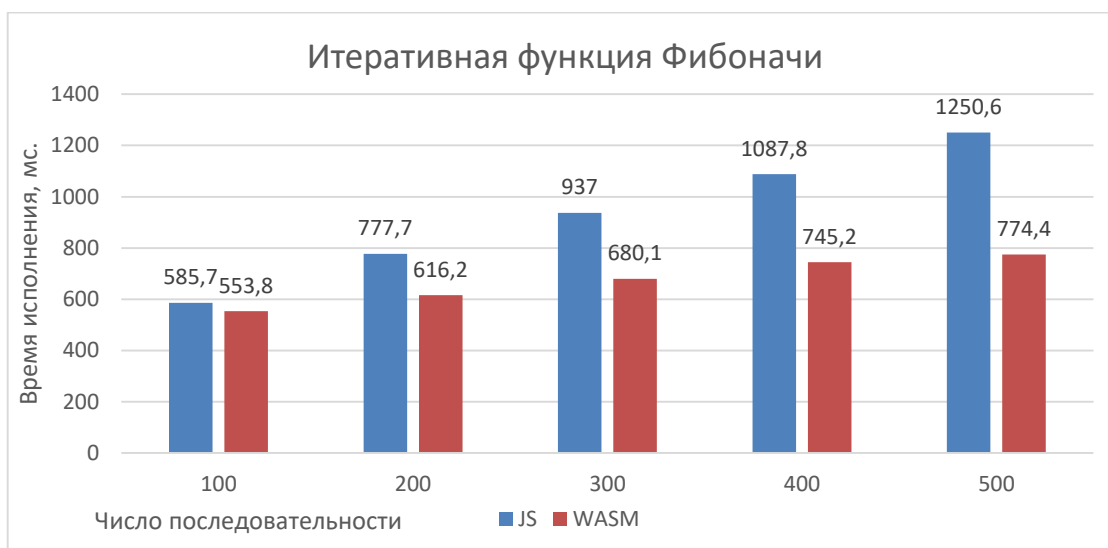


Рисунок 6 – Итеративная функция расчёта n-го числа Фибоначчи, количество запусков 1 000 000, диапазон значений 100–500

Таблица 7 – Итеративная функция расчёта n-го числа Фибоначчи, количество запусков 1 000 000, диапазон значений 1000–5000

N	JS, мс.	WASM, мс.	Ускорение
1000	2111,7	966,0	2,19
2000	3785,3	1464,5	2,58
3000	5399	1945,8	2,77
4000	6945,5	2491,3	2,79
5000	8549,5	3039,9	2,81

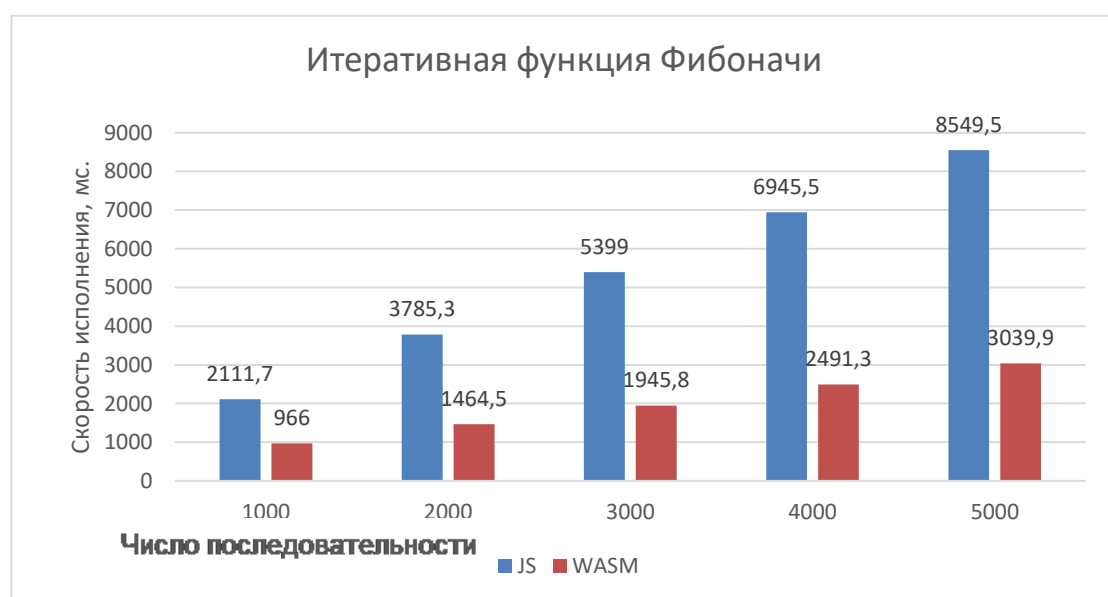


Рисунок 7 – Итеративная функция расчёта n-го числа Фибоначчи, количество запусков 1 000 000, диапазон значений 1000–5000

Таблица 8 – Функция перемножения целых чисел, где n – число перемножений (аргументы: $a = 33$, $b = -4$), количество запусков 100 000

N	JS, мс.	WASM, мс.	Ускорение
10	42,5	41,2	1,03
25	50,2	47,6	1,05
50	56,8	48,2	1,18
75	72,8	48,6	1,5
100	78	50,5	1,54
125	78,9	55,3	1,43
150	85,1	57,6	1,48

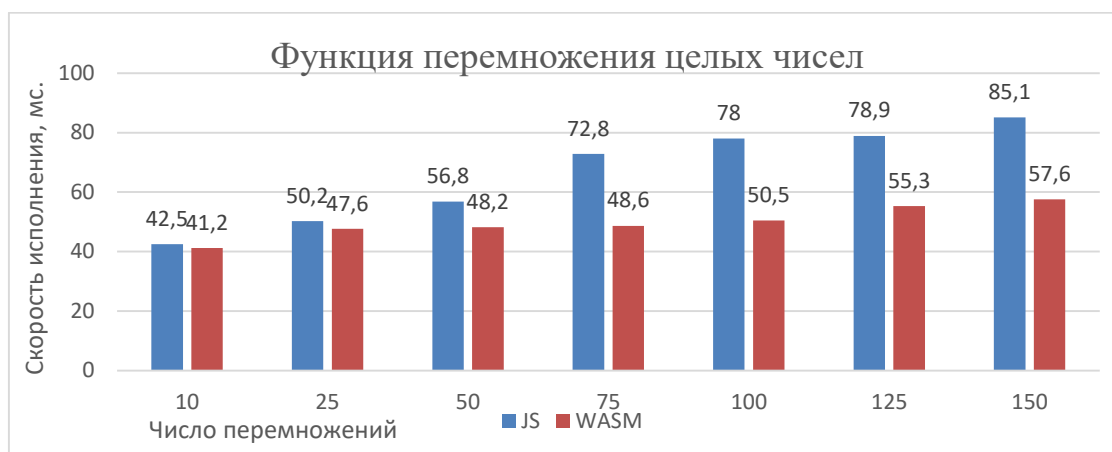


Рисунок 8 – Функция перемножения целых чисел, где n – число перемножений (аргументы: $a = 33$, $b = -4$), количество запусков 100 000

Таблица 9 – Функция перемножения целых чисел, где n – число перемножений (аргументы: $a = 33$, $b = -4$), количество запусков 100 000

N	JS, мс.	WASM, мс.	Ускорение
1000	311,5	143,6	2,17
2000	599	255,1	2,34
3000	859,2	344,5	2,5
4000	1115,8	440,7	2,53
5000	1426,0	559,2	2,55
6000	1676,3	651,2	2,57

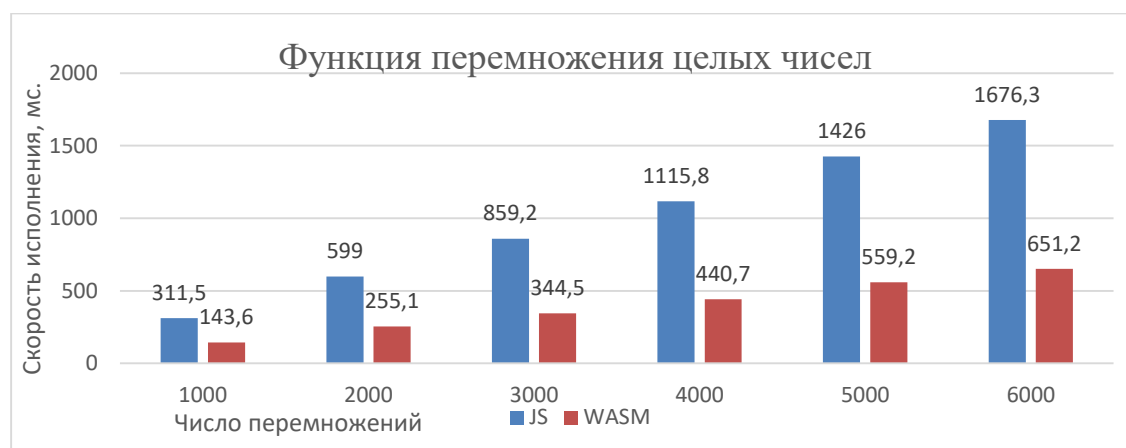


Рисунок 9 – Функция перемножения целых чисел, где n – число перемножений (аргументы: $a = 33$, $b = -4$), количество запусков 100 000

Таблица 10 – Функция перемножения целых чисел, где n – число перемножений (аргументы: $a = 33$, $b = -4$), количество запусков 100 000

N	JS, мс.	WASM, мс.	Ускорение
10000	2753,1	1063	2,58
25000	6820,6	2621,5	2,6
50000	13571,2	5105,9	2,65
75000	20556,8	7701,5	2,67
100000	27000,4	10293,6	2,62

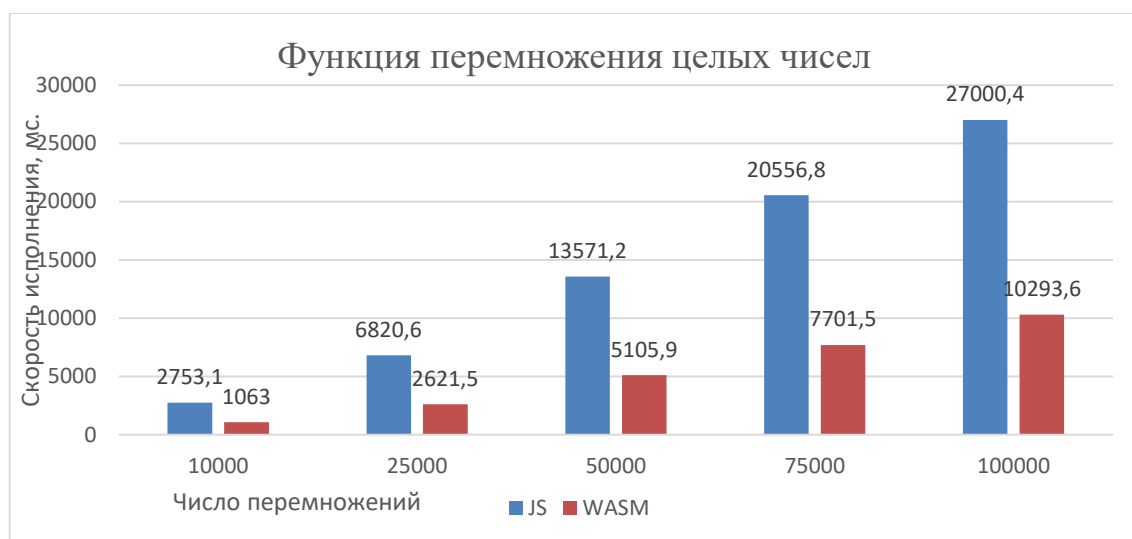


Рисунок 10 – Функция перемножения целых чисел, где n – число перемножений (аргументы: $a = 33$, $b = -4$), количество запусков 100 000

Таблица 11 – Функция перемножения векторов размерности N , количество запусков 10

N	JS, мс.	WASM, мс.	Ускорение
250	0,3	0,199	1,5
500	0,7	0,6	1,166
1000	1,4	1,7	0,823
6000	3,7	10,9	0,34
10000	3,2	13,9	0,23
16000	2,2	25,5	0,024

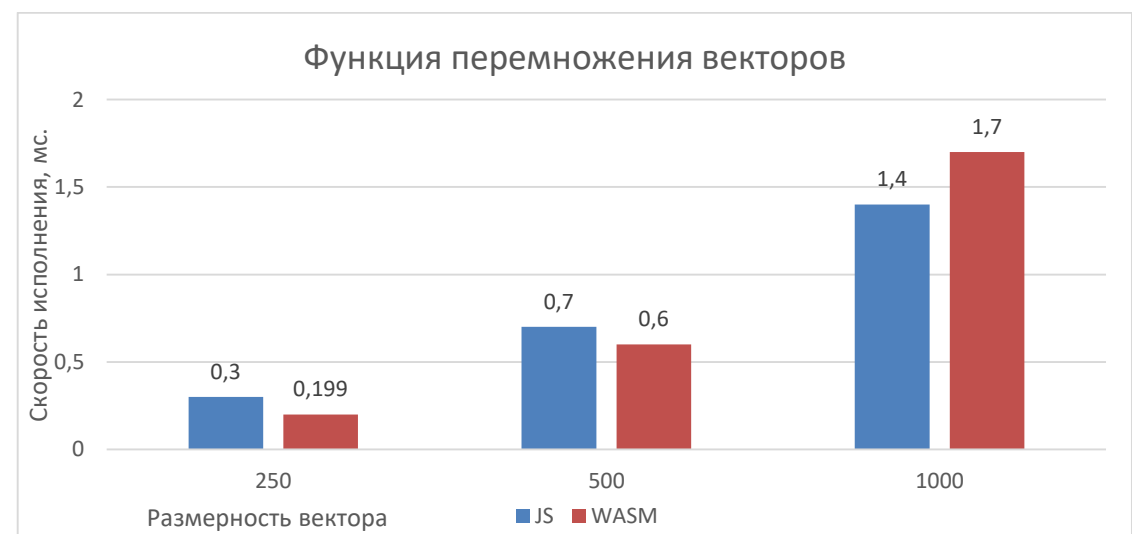


Рисунок 11 – Функция перемножения векторов размерности N , количество запусков 10, размерности 250, 500, 1000

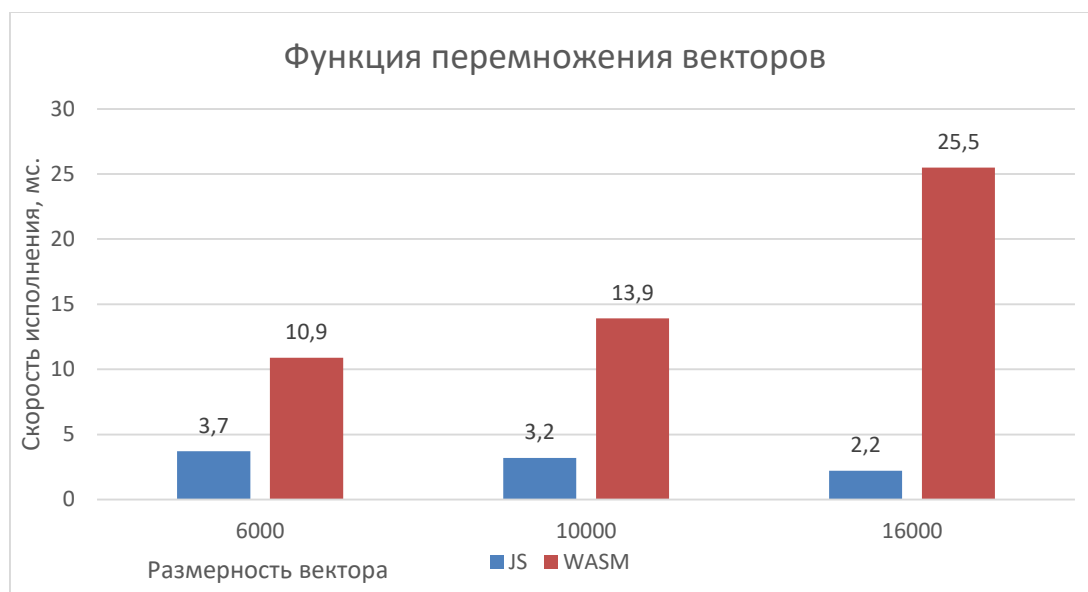


Рисунок 12 – Функция перемножения векторов размерности N, количество запусков 10, размерности 250, 500, 100

Оценим полученные результаты по каждой из протестированных функций.

Рекурсивная функция расчёта n-го числа Фибоначчи. В работе рекурсивной функции WASM прослеживается стабильное ускорение на 25–35 %. В тесте представлен диапазон значений от 40 до 44, однако изменение входных значений функции кардинального влияния на полученное ускорение не оказывает. Таким образом, в случае использования функций с нагруженным стеком вызовов есть смысл отдать предпочтение в сторону использования WASM-версии.

Итеративная функция расчёта n-го числа Фибоначчи. В отличие от рекурсивного варианта, итеративный вариант функции, который сам по себе является гораздо более эффективным, не может гарантировать хотя бы такую же скорость исполнения, как и функция на стандартном JavaScript. Было взято несколько диапазонов входных значений, как те, что были использованы для тестирования рекурсивной функции, так и намного большие. Наблюдалась небольшая тенденция роста ускорения с увеличением входных данных в пределах трёхзначных значений, но так или иначе это все еще хуже исходного JavaScript-варианта без портирования кода. То есть в случае данного теста нет никакой выгоды в использовании WASM.

Функция перемножения целых чисел. Тестирование производилось с одинаковыми аргументами с увеличением количества перемножений. JavaScript показывал лучшие результаты с малым числом перемножений, при 25 перемножений результаты стали одинаковыми, далее с последующим увеличением числа перемножений ускорение в пользу WASM было равно в пределах 10 %.

Функция перемножения векторов. При векторном перемножении WASM показывал хорошие результаты на относительно небольших векторах (длина 250–500). С увеличением длин векторов очень сильно упала производительность и смысл использования технологии пропал вообще.

Полученные результаты дают возможность сделать вывод о том, что использовать WebAssembly не всегда эффективно, а иногда и очень невыгодно с точки зрения производительности. Выделим несколько моментов, влияющих на производительность.

Работа с памятью и вызовы функций. WebAssembly может терять в производительности при многократных вызовах JavaScript-кода. Технология пока ещё теряет в производительности при работе с памятью: обращение выполняет проверку на выход за границы доступного блока памяти.

Также WebAssembly может выигрывать за счёт типа целых переменных. В JS есть только тип Number, фактически это всегда 64-разрядный тип с плавающей точкой и целые числа здесь – это плавающее число без дробной части. При JS-компиляции для целочисленных в движке используется 64-разрядный целый тип [11]. В WASM же предоставляется возможность самостоятельно выбрать разрядность типа, и если мы используем 32-разрядный целый тип, то есть возможность получить преимущество в скорости вычислений, так как операции над 32-разрядными числами немного быстрее, чем над 64-разрядными целыми в JavaScript [10].

Как показала практика, для каждого алгоритма стоит индивидуально определять, будет ли получен прирост скорости с применением WebAssembly. Произведенные опыты позволяют сделать основной вывод, что для обильных вычислений, скорее всего, будет получена более или менее ощутимая выгода.

Выводы. В сравнении с JavaScript, получается, что в среднем WASM быстрее, но при этом возможны индивидуальные ситуации, в которых необходимо разбираться детальнее, потому что

возможен случай получения производительности не только в несколько раз лучше, но так и значительно хуже. Это может зависеть и от используемого браузера, а также его версии.

В каком-то смысле максимально допустимая производительность JS и WASM одинакова, так как оба в итоге преобразуются к низкоуровневому коду процессора. WASM показывает хорошие результаты на объёмных вычислениях, но там, где много операций с памятью WASM, уступает, поскольку основная проблема здесь – это медленный канал общения между JS и WASM.

В июле 2019 года вышла статья «Not So Fast: Analyzing the Performance of WebAssembly vs. Native Code» [12]. Авторами была реализована возможность запуска консольных утилит Linux с использованием WASM, а также ряда тестов для определения производительности в сравнении с этими же тестами, запущенными на `asm.js` и стандартном коде.

Результаты были получены следующие:

- WASM в среднем на 30 % быстрее, чем JavaScript (на рассмотренных тестах);
- WASM в среднем на 50 % медленнее, чем родной код (на рассмотренных тестах).

Авторы статьи также произвели анализ того, что именно не позволяет WASM работать быстрее:

- примерно вдвое больше операций загрузки/сохранения данных по сравнению с родным кодом;
- больше ветвлений – необходимость дополнительных проверок при обращении к памяти;
- больше «кеш-промахов» уровня L1 [12].

В результате проделанного исследования можно выделить основные причины применения рассмотренной технологии:

- увеличение скорости ряда вычислений;
- использование кода на сторонних языках – портирование (C/C++);
- уменьшение времени загрузки приложения.

Уже сейчас WebAssembly активно применяется в следующем:

- графические редакторы, CAD-системы – например, Figma, AutoCAD;
- эмуляторы, виртуальные машины – например, DOSBox;
- веб-клиенты, активно использующие шифрование;
- кодеки и фильтры для аудио/видео – например, ffmpeg;
- базы данных – например, sqlite;
- игры, игровые движки, движки физики, VR/AR – например, Godot, Doom 3.

В будущем среди новых возможностей технологии ожидаются блочные операции над памятью, поддержка SIMD-инструкций, поддержка и использование потоков [10].

Так или иначе WASM – это новая развивающаяся технология, которая, как и любая другая поддерживаемая, предоставляет полезную и интересную альтернативу в мире веб-технологий для решения ряда различных задач. Её применение в определённой обстановке может положительно повлиять на скорость выполнения кода в браузере, следовательно, следить за развитием данной технологии и по возможности внедрять достаточно целесообразно.

Библиографический список

1. Yan, Y. Understanding the Performance of WebAssembly Applications / Y. Yan, T. Tu, L. Zhao, Y. Zhou, W. Wang // IMC'21, November 2–4, 2021. – Virtual Event, USA, 2021.
2. Yee, B. Native Client: A Sandbox for Portable, Untrusted x86 Native Code / B. Yee, D. Sehr, G. Dardyk, J. B. Chen, R. Muth, T. Ormandy, S. Okasaka, N. Narula, N. Fullagar // Communications of the ACM. – January 2010. – Vol. 53, № 1. – P. 91–99.
3. Technical Overview // Chrome Developers. – Режим доступа: <http://developer.chrome.com/docs/native-client/overview/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
4. Van, E. V. A Performant Scheme Interpreter in asm.js / E. V. Van, J. Nicolay, Q. Stiévenart, Th. D'Hondt // Proceedings of the 31st ACM Symposium on Applied Computing, Programming Languages Track (SAC 2016). – 2016. – P. 1941–1951.
5. Resig, J. Asm.js: The JavaScript Compile Target / J. Resig // JavaScript Programming. – Режим доступа: <https://john-resig.com/blog/asmjs-javascript-compile-target/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
6. Why WebAssembly is Faster Than asm.js // The Web developer blog. – Режим доступа: <https://hacks.mozilla.org/2017/03/why-webassembly-is-faster-than-asm-js/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
7. Бородин, О. В. Многопоточная обработка изображений с использованием APIWEB-WORKERS / О. В. Бородин, В. А. Егунов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 3 (55). – С. 33–46.
8. Haas, A. Bringing the Web up to Speed with WebAssembly / A. Haas, A. Rossberg, D. Schuff, B. Titzer // Communications of the ACM. – December 2018. – Vol. 61, № 12. – P. 107–115.
9. Hilbig, A. An Empirical Study of Real-World WebAssembly Binaries / A. Hilbig, D. Lehmann, M. Pradel // WWW'21: Proceedings of the Web Conference, April 2021. – 2021. – P. 2696–2708.
10. Знакомство с WebAssembly // Хабр. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/342180/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
11. Sletten, Brian. WebAssembly: The Definitive Guide: Safe, Fast, and Portable Code / Sletten Brian. – O'Reilly Media, Inc., 2021. – P. 334.
12. Jangda, Abhinav. Not So Fast: Analyzing the Performance of WebAssembly vs. Native Code / Jangda Abhinav, Powers Bobby, Berger Emery D., Guha Arjun // Proceedings of the 2019 USENIX Annual Technical Conference. July 10–12, 2019. – Renton, WA, USA, 2019.

References

1. Yan, Y., Tu, T., Zhao, L., Zhou, Y., Wang, W. Understanding the Performance of WebAssembly Applications. *IMC'21, November 2–4, 2021*. Virtual Event, USA, 2021.
2. Yee, B., Sehr, D., Dardyk, G., Chen, J. B., Muth, R., Ormandy, T., Okasaka, S., Narula, N., Fullagar, N. Native Client: A Sandbox for Portable, Untrusted x86 Native Code. *Communications of the ACM, January 2010*, 2010, vol. 53, no. 1, pp. 91–99.
3. Technical Overview. *Chrome Developers*. Available at: <http://developer.chrome.com/docs/native-client/overview/>.
4. Van, E. V., Nicolay, J., Stiévenart, Q., D'Hondt, Th. A Performant Scheme Interpreter in asm.js. *Proceedings of the 31st ACM Symposium on Applied Computing, Programming Languages Track (SAC 2016)*, 2016, pp. 1941–1951.
5. Resig, J. Asm.js: The JavaScript Compile Target. *JavaScript Programming*. Available at: <https://john-resig.com/blog/asmjs-javascript-compile-target/>.
6. Why WebAssembly is Faster Than asm.js. *The Web developer blog*. Available at: <https://hacks.mozilla.org/2017/03/why-webassembly-is-faster-than-asm-js>.
7. Borodin, O. V., Egunov, V. A. Mnogopotchnaya obrabotka izobrazheniy s ispolzovaniem APIWEB-WORKERS [Multithreaded image processing using APIWEB-WORKERS]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2021, no. 3 (55), pp. 33–46.
8. Haas, A., Rossberg, A., Schuff, D., Titzer, B. Bringing the Web up to Speed with WebAssembly. *Communications of the ACM, December 2018*, 2018, vol. 61, no. 12, pp. 107–115.
9. Hilbig, A., Lehmann, D., Pradel, M. An Empirical Study of Real-World WebAssembly Binaries. *WWW '21: Proceedings of the Web Conference, April 2021*, 2021, pp. 2696–270810.
10. Znakomstvo s WebAssembly [Getting to know WebAssembly]. *Habr*. Available at: <https://habr.com/ru/post/342180/>.
11. Sletten, Brian. *WebAssembly: The Definitive Guide: Safe, Fast, and Portable Code*. O'Reilly Media, Inc., 2021, p. 334.
12. Jangda, Abhinav, Powers, Bobby, Berger, Emery D., Guha, Arjun. Not So Fast: Analyzing the Performance of WebAssembly vs. Native Code. *Proceedings of the 2019 USENIX Annual Technical Conference. July 10–12, 2019*. Renton, WA, USA, 2019.

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

DOI 10.54398/20741707_2022_2_84

УДК 681.3

АССОЦИАТИВНАЯ СТЕГАНОГРАФИЯ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Статья поступила в редакцию 14.04.2022, в окончательном варианте – 02.05.2022.

Вершинин Игорь Сергеевич, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, кандидат технических наук, зав. кафедрой компьютерных систем, ORCID: 0000-0001-5166-2862, e-mail: ISVershinin@kai.ru

Дается определение понятия ассоциативной стеганографии (АС). Рассматривается базовый для ассоциативной стеганографии алгоритм маскирования заданного конечного множества бинарных матриц-эталонов десятичных цифр одинаковых размеров. Проведено исследование свойств базового алгоритма, помехоустойчивости ассоциативной защиты данных, предложен метод ее повышения. Дается оценка стегостойкости и криптостойкости (если стегостойкость не безусловна) ассоциативной защиты данных. Рассматриваются вопросы применения ассоциативной стеганографии для защиты картографических сцен и текстов, организации систем управления базами данных с такой защитой.

Ключевые слова: ассоциативная стеганография, помехоустойчивость, стегостойкость, криптостойкость, ассоциативная защита картографических и текстовых сцен

ASSOCIATIVE STEGANOGRAPHY: STATE AND PROSPECTS

The article was received by the editorial board on 14.04.2022, in the final version – 02.05.2022.

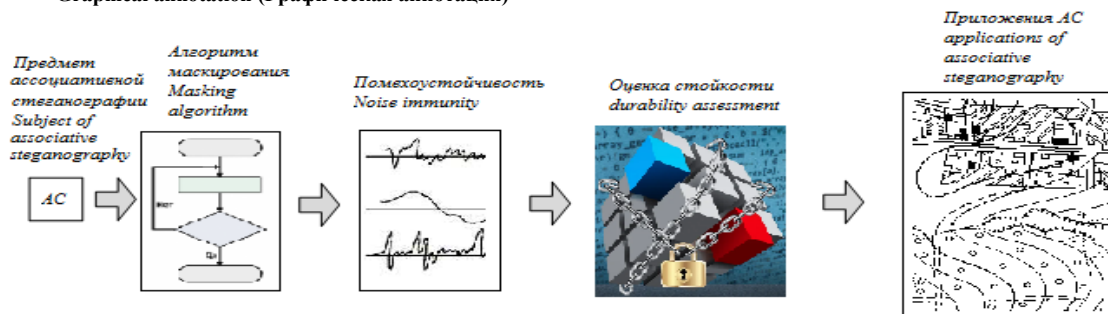
Vershinin Igor S., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, 10 K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Head of the Computer Systems Department, ORCID: 0000-0001-5166-2862, e-mail: ISVershinin@kai.ru

The definition of the concept of associative steganography is given. The basic algorithm for associative steganography for masking a given finite set of binary matrices-standards of decimal digits of the same size is considered. A study of the properties of the basic algorithm, noise immunity of associative data protection, and a method for improving it is proposed. The assessment of the stegodurability and cryptodurability (if the stegodurability is not unconditional) of associative data protection is given. The issues of the use of associative steganography for the protection of cartographic scenes and texts, the organization of database management systems with such protection are considered.

Keywords: associative steganography, noise immunity, stegodurability, cryptodurability, associative protection of cartographic and text scenes

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Предметом ассоциативной стеганографии является анализ защищенных двумерных сцен. Под сценой понимают картину (изображение) с множеством объектов. Задача анализа сцен – одна из задач распознавания образов, когда не интересуются «тонкой структурой» изображения, а всего лишь укрупненным описанием того, что на нем представлено, в терминах «объекты – координаты» [1]. Число имен объектов и градаций их координат полагается конечным и заведомо известным.

Используется k-разрядное десятичное кодирование координат и имен объектов. Исходная информация по сцене структурируется как таблица с множеством записей, представленная на рисунке 1. Каждая десятичная цифра представлена своей двоичной матрицей-эталонем размерами $m \times n$, $m = 2n - 1$ (рисунок 2 – пример представления символа 9 для $n = 5$).

Код объекта	Координата X	Координата Y
-------------	--------------	--------------

Рисунок 1 – Вид структурированной таблицы

Защита организуется трансформацией этих матриц в троичные путем их маскирования. Под маскированием понимается генерация матрицы масок для каждой матрицы-эталона.

Размеры матриц-эталонов и масок – одинаковы. Маска определяет позиции тех битов в матрице-эталоне, которые не должны подвергаться изменению и используются для дальнейшей идентификации эталона. Генерация масок осуществляется случайным образом с использованием АЛГОРИТМА маскирования. Полученный в результате набор масок представляет собой ключ распознавания, которое выполняется путем двумерно-ассоциативного различения каждой цифры кода на множестве троичных эталонов, элементы которого принадлежат $\{0, 1, -\}$.

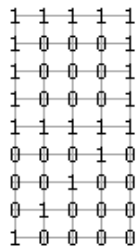


Рисунок 2 – Представление символа 9

Троичное представление любого объекта (координаты) помещается с использованием масок в стегоконтейнер. Стегоконтейнер изначально заполнен отрезком псевдослучайной последовательности (ПСП). Его длина, определяемая разрядностью кода и размерами матриц, всегда много больше объема полезной информации, определяемого числом сохраняемых (незамаскированных) бит. Принцип формирования стегоконтейнеров показан на рисунке 3.

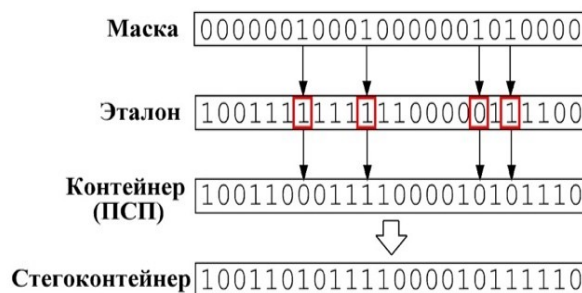


Рисунок 3 – Принцип формирования стегоконтейнеров

В качестве основы предлагаемого метода защиты используется противопоставление сообщений не-единичного множества. Для заданного множества эталонов формируется ключ, представляющий собой набор масок. Он определяет ограниченное количество бит в бинарных матрицах-эталонах, которые остаются истинными. Эти биты случайно распределены по битовой сетке эталона. Существенные биты символов располагаются по внешнему контуру и внутреннему «зигзагу» матриц (рис. 4; $a - n = 3$, $b - n = 7$) суммарной длиной $(9n - 12)$. Размер ключа определяется только количеством эталонов и размерами матриц-эталонов вне зависимости от размера сообщения.

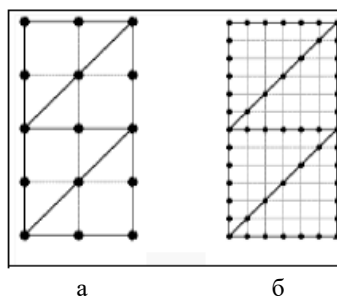


Рисунок 4 – Внешний контур и внутренний «зигзаг»: $a - n = 3$; $b - n = 7$

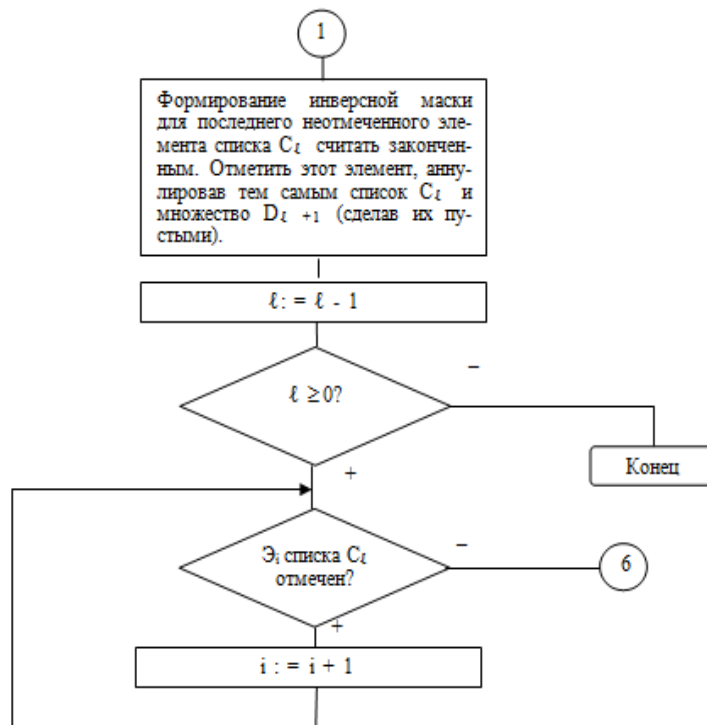


Рисунок 5 – Блок-схема АЛГОРИТМА

Один из возможных результатов работы АЛГОРИТМА представлен на рисунке 6. Точками показаны сохраняемые биты, размер эталонов – 5×3 .

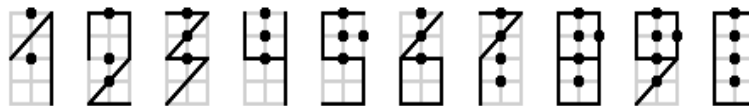


Рисунок 6 – Результат работы АЛГОРИТМА

Основополагающее свойство АЛГОРИТМА для всей ассоциативной стеганографии устанавливает следующее.

Теорема 1. Для произвольной бинарной матрицы размером $m \times n$ проведение процедуры распознавания на множестве эталонов тех же размеров по маскам, сгенерированным с использованием АЛГОРИТМА, приведет к распознаванию в этой матрице одного и только одного эталона из указанного множества.

Указанное свойство используется при определении помехоустойчивости и стойкости предлагаемого метода.

Помехоустойчивость. Проведены исследования по определению помехоустойчивости предлагаемого метода к действию случайных и преднамеренных помех. В качестве исходной информации, подлежащей хранению или передаче, используется набор стегоконтейнеров (кодовых слов), состоящих из трех букв (почтовых индексов), погруженных по маске в ПСП. Размер каждого стегоконтейнера составляет 198 байт при $n = 60$.

Для случайных помех рассматривалось два случая:

1. Для каждого кодового слова случайные помехи локализованы в пределах 16 байт
2. В каждом кодовом слове искажено более 16 байт.

В обоих случаях проводилось сравнение с (255, 223)-кодом Рида – Соломона.

Также проводилось исследование помехоустойчивости и к действию преднамеренных помех. Установлена необходимость введения избыточности для повышения помехоустойчивости. При этом происходит внедрение избыточности не в передаваемом сообщении, а на уровне ключей. Суть введения избыточности на уровне ключей состоит в следующем. Процедура маскирования и формирование стегоконтейнеров происходит с использованием множества наборов масок Q . Количество наборов масок всегда нечетное (3, 5, 7, ...). Распознавание также происходит с использованием всех наборов масок на основе принципа большинства, т.е. результатом распознавания является символ, число распознаваний которого больше или равно $(Q+1)/2$. Если данное условие не выполняется, фиксируется факт отказа от распознавания.

Но даже при отсутствии избыточности применение метода ассоциативной стегозащиты позволяет увеличить степень стойкости к обоим типам помех в сравнении с иными существующими методами защиты информации: допускается искажение до 3 % хранимых и передаваемых бит вместо 1,5 % – для ГОСТ 28147-89 [3, 4]. Использование избыточного маскирования повышает эту оценку до 6 %.

Самым значимым результатом при введении избыточности на уровне ключей является отсутствие неверных распознаваний по сравнению с рассмотренным (255, 223)-кодом Рида – Соломона в случае действия случайных помех при искажении более 16 байт. Также установлена принципиальная возможность противодействия наличию многократной аддитивной помехи при выборе $Q = 5$. Обобщая оба результата (для борьбы как со случайными, так и с преднамеренными помехами), на практике следует использовать $Q = 7$. Это можно обосновать тем, что в реальных системах приемопередачи сообщений практически невозможно определить тип действующей помехи (либо обеих помех), а также ту часть сообщения, на которые эти помехи воздействуют. Исходя из этого, целесообразно смириться с различного рода потерями временного и технического характера при использовании семи наборов масок в угоду сохранения целостности данных, так как их потеря является гораздо более критическим событием.

Стойкость ассоциативной защиты. Особенностью стегосистем являются затруднения в установлении самого факта передачи сообщений, связываемые с понятием стегостойкости. Она безусловна, если затруднения трансформируются в практическую невозможность. Это имеет место, когда ПСП непрерывно генерируется на множестве контейнеров и рост суммарной длины ПСП растет с увеличением n при неизменном среднем числе вкраплений. Но при постоянстве n и росте числа контейнеров в стегосообщении объем вкраплений и длина ПСП нарастают линейно, и условие неразличимости «пустого» и стегоконтейнеров не выполняется. Тогда необходимо провести специальный стегоанализ по выявлению требований неразличимости для рассматриваемых систем. Если и ее не будет, необходим дополнительный криптоанализ. Он полезен и при возникновении у противника каких-то сомнений в передаче «пустых» контейнеров. Проведенный криптоанализ ограничен случаем воздействия всего лишь трех характерных криптоатак – «лобовая», на ГАММУ и со знанием открытого текста, в том числе и для избыточного маскирования, когда для сокрытия сообщений одновременно используются несколько наборов масок с целью повышения помехоустойчивости при хранении и передаче данных.

По результатам проведенных исследований [5, 6] установлено, что следование принципам ассоциативной стеганографии позволяет обеспечить доказуемую стойкость предлагаемого метода. Это – достаточно «сильное» свойство, которое строго установлено только для шифров с применением гаммирования [4].

Стратегия ассоциативной стегозащиты сцен картографии. В основе принятой стратегии защиты картографических сцен лежит представление сцены в виде множества таблиц-отношений, атрибутами которых являются десятичные коды объектов и их координат. Замаскированные тройки <ИМЯ ОБЪЕКТА><КООРДИНАТА X><КООРДИНАТА Y> размещаются в трех стегоконтейнерах. Изначально каждый стегоконтейнер заполняется отрезком псевдослучайной последовательности (ПСП) той же длины. Затем выполняется «вкрапление» в него по маске значимых бит матриц A^i .

Для пояснения принципов формирования искомого множества таблиц-отношений для случая точечных объектов рассмотрим пример картографической сцены с нанесенной на ней глобальной координатной сеткой (рис. 6, Y и X – максимальные значения координат y и x).

Кластер отображается на сцене прямоугольником определенных размеров. Внутри кластера наносится локальная координатная сетка. Принимая в качестве погрешности величину ϵ , получаем шаг локальной координатной сетки 2ϵ . Понятие ассоциативной стеганографии предполагает полноту множества задействованных кодов объектов и градаций их координат для данной разрядности кода k . Иными словами, мощность этого множества $\Gamma = 10^k$. Значение k выбирается из условия равного числа градаций локальной и глобальной сеток.

Принцип формирования кластеров:

1. Случайным образом выбираем некоторую строку исходной таблицы. Отмечаем эту строку. Определяем *глобальные координаты* выделяемого кластера (рис. 6). Сама же запись преобразуется к виду:

Код объекта	(x, y)
-------------	--------

Здесь (x, y) – локальные координаты выделенного объекта в данном кластере.

2. Пункт 1 повторяется на множестве неотмеченных строк. При этом каждый раз устанавливается, принадлежит ли вновь выделенная строка к одному из ранее введенных кластеров. Далее происходит преобразование координат из глобальных в тексте в локальные в кластере. Если такого кластера нет, создается новый кластер. И так до тех пор, пока не будут рассмотрены все записи исходной таблицы.

3. Обеспечивается равное количество записей во всех кластерах для повышения стойкости защиты. Для этого вводятся так называемые «пустые» (несуществующие) объекты и координаты. Они подлежат сокрытию вместе с реально существующими объектами и координатами.

4. Чтобы скрыть положение в кластере его «родителя», все записи в каждом кластере подлежат перемешиванию.

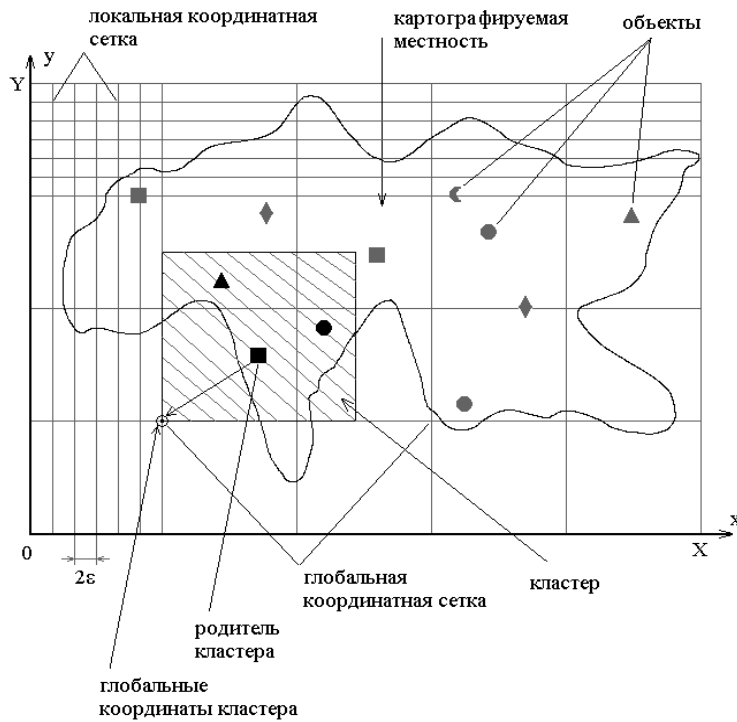


Рисунок 6 – Пример картографической сцены

Организация систем БД картографии с ассоциативной защитой. За основу построения специализированной СУБД с ассоциативной защитой (АЗ) берется «интеллектуальная» файл-серверная организация взаимодействия (рис. 7). Предлагаемая инфологическая схема БД полнообъектных картографических сцен (ПКС) с ассоциативной защитой показана на рисунке 8. Принят единообразный формат хранения данных для всех (точечных, линейных и площадных) объектов [7].

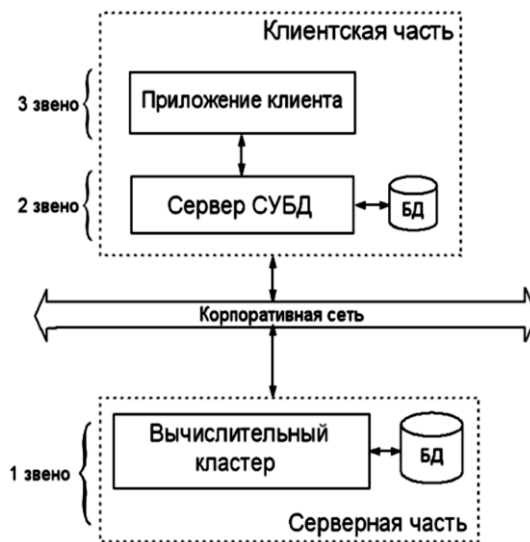


Рисунок 7 – Организация СУБД с ассоциативной защитой

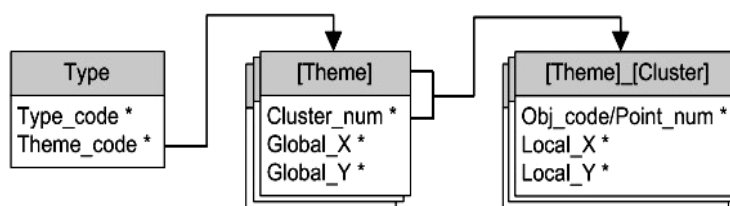


Рисунок 8 – Инфологическая схема баз данных полнообъектных картографических сцен с ассоциативной защитой

В рамках предлагаемой схемы выделяются наборы таблиц-отношений. Для каждого тематического слоя создается отдельная таблица, которая описывает кластеры внутри этого слоя. Также отдельная таблица создается для каждого кластера, в которой описываются объекты внутри этого кластера.

Принципы взаимодействия между отношениями этих таблиц определяются процедурами серверной программы во время обработки запроса. Связи на рисунке 9 указывают на формирование SQL-поискового запроса в таблице, имя которой определяется по окончании формирования раскрытого стегакода из предыдущей таблицы.

Описание отношений:

- Type – отношение, содержащее информацию о всех тематических слоях сцены;
- [Theme] – набор отношений, каждое из которых описывает отдельный тематический слой;
- [Theme]_[Cluster] – набор отношений, каждое из которых описывает содержимое (объекты) одного кластера какого-либо тематического слоя;
- Type_code* – определяет тип слоя: слой точечных, слой линейных или слой площадных объектов;
- Theme_Code* – уникальный код тематического слоя;
- Cluster_num* – код номера кластера в тематическом слое;
- Global_X*, Global_Y* – глобальные координаты нижнего левого угла данного кластера;
- Obj_code/Point_num* – код точечного объекта (код номера узловой точки линейного или площадного объекта);
- Local_X*, Local_Y* – локальные координаты точки/узла внутри кластера.

Звездочкой отмечены данные об атрибутах, которые должны храниться в замаскированном виде.

Создание кластеров производится в соответствии с принципами формирования кластеров, рассмотренными выше. Для каждого создаваемого кластера осуществляется присвоение ему очередного (по порядку) номера. Координаты кластера выбираются согласно рисунку 6. Номер и координаты записываются в рабочее отношение [Наименование слоя], которое описывает кластеры этого слоя. Порядок строк в табличных отношениях-кластерах, которые включают как значимые, так и пустые записи, выбирается произвольно.

Для пустых элементов данного тематического слоя (т.е. для пустых точечных объектов либо узловых точек линейных или площадных объектов) произвольно осуществляется выбор кода из множества неиспользуемых в этом слое кодов объектов /узловых точек. Для этого определяется количество точек N_{\max}^{points} в кластере данного тематического слоя с наибольшим количеством записей. Затем для каждого кластера-отношения данного слоя осуществляется дополнение «пустыми точками» до значения N_{\max}^{points} .

С помощью дополнительного отношения со следующим форматом замаскированных записей клиент выполняет фильтрацию пустых записей:

theme type	theme code	N_{\max}^{points}
------------	------------	----------------------------

Следует отметить, что никаких дополнительных ограничений из-за наличия нумерации узловых точек на линейные размеры линейных/площадных объектов и размер кластеров, получаемых в процессе формирования сцены, не накладывается.

После получения ответа на запрос пользователя от сервера клиентская сторона должна выполнить процедуру раскрытия сокрытых данных. Помимо этого, необходимо восстановить порядок следования узловых точек для линейных/площадных объектов. Это достигается проведением процедуры сортировки.

Ассоциативно-стеганографический подход к защите текстовых сообщений. Ассоциативная стеганография вполне приемлема и для защиты текстовых характеристик различных объектов [8, 9]. Предлагаемая инфологическая схема БД замаскированной текстовой информации показана на рисунке 9.

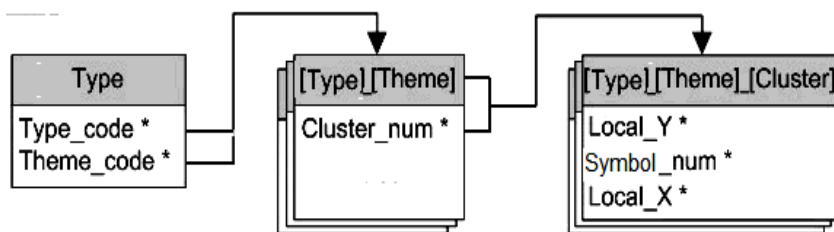


Рисунок 9 – Инфологическая схема текстовой базы данных с ассоциативной защитой

Описание отношений:

- Type – отношение, содержащее информацию о всех тематических слоях, представленных парой сокрытых кодов: Код типа – Код слоя;
- [Type]_[Theme] – набор отношений, каждое из которых описывает отдельный тематический слой;
- [Type]_[Theme]_[Cluster] – набор отношений, каждое из которых представляет одну из характеристик данного объекта;
- Cluster_num* – может отражать номер страницы. Один кластер (фрагмент) на одну страницу;
- Local_X / Local_Y * – номер строки и позиция в строке;
- Symbol_num * – трехразрядный код символа.

Как и ранее, звездочкой отмечены данные об атрибутах, которые должны храниться в замаскированном виде. Формат записи в кластере:

Код номера строки (Local_Y*)	Код символа (Symbol_num*)	Код позиции в строке (Local_X*)
---------------------------------	------------------------------	------------------------------------

Перспективы. Дальнейшее развитие ассоциативной стеганографии связывается с:

- 1) анализом целесообразности непрерывной матричной бинаризации и маскирования символов без указания их координат при ассоциативной защите текстов с целью дополнительного снижения объема передач в три раза;
- 2) доведением разработанных исследовательских версий соответствующих СУБД до готовых к широкому практическому применению программных продуктов;
- 3) развитием *новых приложений* ассоциативной стеганографии.

Заключение. По результатам проведенного рассмотрения определено понятие ассоциативной стеганографии, разработан базовый алгоритм маскирования кодовых представлений данных схемы (объектов и их координат), сформулирована основополагающая теорема, важная для всей ассоциативной стеганографии. Разработан метод повышения помехоустойчивости ассоциативной стеганографии к действию случайных и преднамеренных помех, основанный на использовании избыточного маскирования. Предложена стратегия защиты картографических и текстовых сцен, основанная на принципах ассоциативной стеганографии. Развита подходы к управлению базами данных картографических и текстовых сцен с ассоциативной защитой, основанные на построении инфологических схем БД, что позволило выделить принципиальные особенности специализированных СУБД [10] с ассоциативной защитой.

Библиографический список

1. Дуда, Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харг. – Москва : Мир, 1976. – 511 с.
2. Вершинин, И. С. Распределенное управление защищенными картографическими базами данных / И. С. Вершинин, Р. Ф. Гибадуллин, А. Е. Прохоров // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах : материалы 8-й Междунар. конф. НРС-2008. – Казань : КГТУ, 2008. – С. 216–221.
3. ГОСТ 28147-89. Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования. – Москва : Госстандарт СССР, 1989.
4. Schneier, B. *Applied Cryptography* / B. Schneier. – 2nd ed. – John Wiley&Sons, 1996.
5. Raikhlin, V. A. The Elements of Associative Steganography Theory / V. A. Raikhlin, R. F. Gibadullin, I. S. Vershinin // *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics*. – 2019. – Vol. 43, iss. 1. – P. 40–46.
6. Vershinin, I. S. Associative Steganography. Durability of Associative Protection of Information / I. S. Vershinin, R. F. Gibadullin, S. V. Pystogov, V. A. Raikhlin // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2020. – № 3. – P. 439–449.
7. Raikhlin, V. A. Reliable Recognition of Masked Binary Matrices. Connection to Information Security in Map Systems / V. A. Raikhlin, I. S. Vershinin, R. F. Gibadullin, S. V. Pystogov // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2013. – Vol. 34, № 4. – P. 319–325.
8. Vershinin, I. S. Associative Steganography of Text Messages / I. S. Vershinin, R. F. Gibadullin, S. V. Pystogov, V. A. Raikhlin // *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetic*. – 2021. – Vol. 45, № 1. – P. 1–11.
9. Raikhlin, V. A. Is it possible to reduce the sizes of stegomessages in associative steganography? / V. A. Raikhlin, R. F. Gibadullin, I. S. Vershinin // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2022. – Vol. 43, № 2. – P. 455–462.
10. Карасев, Д. С. Исследование проблем работы и создания специализированной СУБД / Д. С. Карасев // *Научный аспект*. – 2012. – № 2. – С. 148–149.

References

1. Duda, R., Hart, P. *Raspoznavanie obrazov i analiz sts en* [Pattern recognition and image analyze]. Moscow, Mir Publ., 1976. 511 p.
2. Vershinin, I. S., Gibadullin, R. F., Prokhorov, A. E. *Raspredelennoe upravlenie zashishennymi kartograficheskimi bazami dannykh* [Distributed management of secure cartographic databases]. *Vysokoproizvoditelnye parallelnye vychisleniya na klasternykh sistemakh : materialy 8-y Mezhdunarodnoy konferentsii NRS-2008* [High-performance parallel computing on cluster systems: Proceedings of the 8th International Conference NRS-2008]. Kazan, Kazan State Technical University, 2008, pp. 216–221.
3. *GOST 28147-89. Sistemy obrabotki informacii. Zashita kriptograficheskaya. Algoritm kriptograficheskogo preobrazovaniya* [Information processing systems. Cryptographic protection. Cryptographic Conversion Algorithm]. Moscow, Gosstandart SSSR Publ., 1989.
4. Schneier, B. *Applied Cryptography*. 2nd ed. John Wiley&Sons, 1996.
5. Raikhlin, V. A., Vershinin, I. S., Gibadullin, R. F. *The Elements of Associative Steganography Theory*. *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics*, 2019, vol. 43, iss.1, pp. 40–46.
6. Vershinin, I. S., Gibadullin, R. F., Pystogov, S. V., Raikhlin, V. A. *Associative Steganography. Durability of Associative Protection of Information*. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2020, no. 3, pp. 439–449.
7. Raikhlin, V. A., Vershinin, I. S., Gibadullin, R. F., Pystogov, S. V. *Reliable Recognition of Masked Binary Matrices. Connection to Information Security in Map Systems*. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2013, vol. 34, no. 4, pp. 319–325.
8. Vershinin, I. S., Gibadullin, R. F., Pystogov, S. V., Raikhlin, V. A. *Associative Steganography of Text Messages*. *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetic*, 2021, vol. 45, no. 1, pp. 1–11.
9. Raikhlin, V. A., Gibadullin, R. F., Vershinin, I. S. *Is it possible to reduce the sizes of stegomessages in associative steganography?* *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2022, vol. 43, no. 2, pp. 455–462.
10. Karasev, D. S. *Issledovanie problem raboty i sozdaniia spetsializirovannoi SUBD* [Research of problems of work and creation of a specialized DBMS]. *Nauchnyi aspekt* [Scientific Aspect], 2012, no. 2, pp. 148–149.

DOI 10.54398/20741707_2022_2_92
УДК 004.896

АНАЛИЗ РИСКОВ НАРУШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РОЕВЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРИ МАСШТАБИРОВАНИИ ЧИСЛЕННОСТИ АГЕНТОВ¹

Статья поступила в редакцию 26.03.2022, в окончательном варианте – 28.04.2022.

Петренко Вячеслав Иванович, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой организации и технологии защиты информации,
ORCID: 0000-0003-4293-7013, e-mail: vipetrenko@ncfu.ru

Тебуева Фариза Биляловна, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой компьютерной безопасности,
ORCID: 0000-0002-7373-4692, e-mail: fbtebueva@ncfu.ru

Павлов Андрей Сергеевич, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
старший преподаватель, ORCID: 0000-0002-8413-8706, e-mail: anspravlov@ncfu.ru

Стручков Игорь Владиславович, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
аспирант, ORCID: 0000-0001-8744-498X, e-mail: selentar@bk.ru

Применение роевых робототехнических систем (РРТС) в сложных прикладных задачах позволяет существенно увеличить эффективность решения подобных задач. При этом функционирование РРТС в условиях агрессивной окружающей среды, в том числе в условиях противодействия со стороны противника, обуславливает необходимость обеспечения информационной безопасности (ИБ), что особенно важно для стратегических объектов. Основные исследования ИБ в РРТС направлены, как правило, на адаптацию методов обеспечения ИБ для различных видов систем. Однако РРТС как один из видов групповой робототехники имеют ряд отличий и дополнительных требований к обеспечению ИБ. Дополнительные требования обусловлены критическим характером потенциального ущерба при реализации различных сценариев атак. Одним из актуальных направлений ИБ РРТС является вопрос противодействия атакам, не имеющим явно выраженных признаков. В рамках решения данного вопроса основное внимание уделяется задаче выявления и идентификации вредоносных агентов в процессе функционирования системы путем анализа поведения агентов и определения показателя доверия. При этом мало изученным остается вопрос аутентификации и авторизации агентов РРТС, что свидетельствует об отсутствии комплексного решения, позволяющего не только своевременно выявить факт атаки и идентифицировать вредоносных агентов системы, но и снизить вероятность внедрения вредоносных агентов в функционирующую систему. В данной работе проведено обобщение известных результатов в области проектирования и разработки РРТС, представлены обобщенная модель функционирования РРТС, а также проведен анализ приложений РРТС, в результате которого выделен класс пространственно-распределенных задач. Данный класс задач характеризуется расщепленностью агентов таким образом, что возможности бортовых телекоммуникационных устройств не обеспечивают стабильного информационного обмена между агентами в процессе выполнения задач. Также данный класс задач подразумевает возможность повышения сложности задачи (например, увеличение рабочей области), что требует привлечения новых агентов для максимизации эффективности выполнения задач. Исходя из полученных результатов, был проведен анализ уязвимостей РРТС при выполнении пространственно-распределенных задач, сформулированы обобщенные модели угроз и нарушителя ИБ РРТС с учетом свойств, характерных для систем данного вида, при этом основной акцент сделан на свойство масштабируемости РРТС. Проведена количественная оценка влияния внедренных вредоносных агентов на результат функционирования РРТС. Обосновано направление дальнейших исследований, которые позволят организовать комплексную защиту информации в РРТС совместно с существующими решениями, тем самым повысить уровень ИБ РРТС при воздействии вредоносных агентов.

Ключевые слова: роевые робототехнические системы, информационная безопасность, внедрение вредоносных агентов, распределение задач

ANALYSIS OF THE INFORMATION SECURITY OF SWARM ROBOTICS IN THE PROCESS OF SCALING THE NUMBER OF AGENTS

The article was received by the editorial board on 24.03.2022, in the final version – 28.04.2022.

Petrenko Vyacheslav I., North Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Head of Department of Organization and Technology of Information Security,
ORCID: 0000-0003-4293-7013, e-mail: vipetrenko@ncfu.ru

Tebueva Fariza B., North Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Department, of Computer Security, ORCID: 0000-0002-7373-4692, e-mail: fbtebueva@ncfu.ru

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Минцифры России (грант ИБ, проект № 45/21-к).

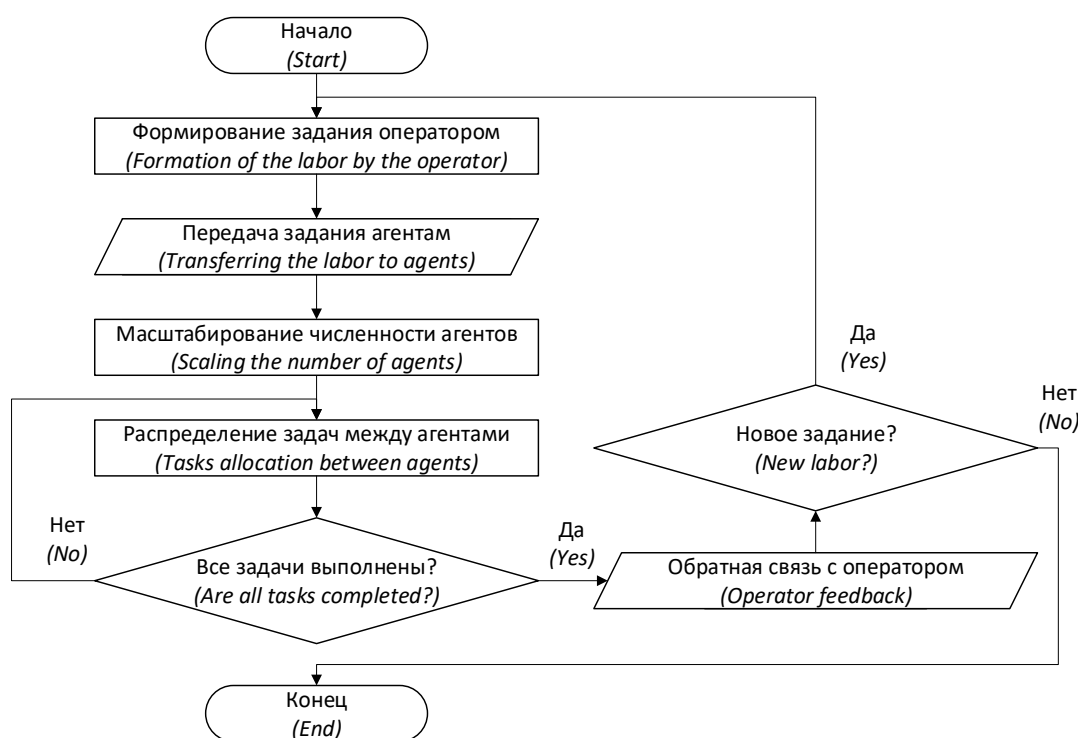
Pavlov Andrey S., North Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation, Senior Lecturer, ORCID: 0000-0002-8413-8706, e-mail: anspavlov@ncfu.ru

Struchkov Igor V., North Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation, postgraduate student, ORCID: 0000-0001-8744-498X, e-mail: selentar@bk.ru

The use of swarm robotic systems (SRS) in complex applied problems can significantly increase the efficiency of solving such problems. At the same time, the functioning of the SRS in an aggressive environment, including in the face of opposition from the enemy, necessitates information security (IS), which is especially important for strategic facilities. The main IS research in the SRS is usually aimed at adapting the methods of providing IS for various types of systems. However, SRS, as one of the types of group robotics, have a number of differences and additional requirements for providing information security. Additional requirements are due to the critical nature of the potential damage in the implementation of various attack scenarios. One of the topical areas of IS SRS is the issue of countering attacks that do not have explicit signs. As part of solving this issue, the main attention is paid to the task of detecting and identifying malicious agents in the process of system operation by analyzing the behavior of agents and determining the trust indicator. At the same time, the issue of authentication and authorization of SRS agents remains little studied, which indicates the absence of a comprehensive solution that allows not only to timely detect the fact of an attack and identify malicious system agents, but also reduce the likelihood of malicious agents infiltrating a functioning system. In this paper, a generalization of known results in the field of design and development of SRS is carried out, a generalized model of SRS operation is presented, and an analysis of SRS applications is carried out, as a result of which a class of spatially distributed problems is identified. This class of tasks is characterized by dispersed agents in such a way that the capabilities of on-board telecommunication devices do not provide a stable information exchange between agents in the process of performing tasks. Also, this class of tasks implies the possibility of increasing the complexity of the task (for example, increasing the workspace), which requires the involvement of new agents to maximize the efficiency of task execution. Based on the results obtained, an analysis of SRS vulnerabilities was carried out when performing spatially distributed tasks, generalized models of threats and an intruder of SRS IS were formulated, taking into account the properties characteristic of systems of this type, with the main emphasis on the scalability property of SRS. A quantitative assessment of the impact of embedded malicious agents on the result of the functioning of the SRS was carried out. The direction of further research is substantiated, which will allow organizing complex information protection in SRS together with existing solutions, thereby increasing the level of SRS IS under the influence of malicious agents.

Keywords: swarm robotic systems, information security, introduction of malicious agents, tasks allocation

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям актуализирует направление развития роевой робототехники как вида групповой робототехники. Роевые робототехнические системы (РРТС) предназначены для решения широкого спектра задач: мониторинг и ликвидация чрезвычайных ситуаций, спасательные операции, подводные исследования, сельскохозяйственные работы, разведывательные операции, а также многие другие [1]. Наличие большого количества прикладных задач, решение которых характеризуется высокой трудоемкостью, неопределенностью и требованием работы в масштабе реального времени в условиях воздействия противоречивых, а также

часто меняющихся факторов обуславливает непрерывно растущий интерес к роевой робототехнике. При этом, ввиду увеличения сложности проектирования и разработки РРТС, специалистами в данной области уделяется особое внимание вопросам обеспечения информационной безопасности (ИБ) как всей системы, так и отдельных ее элементов.

Данная работа построена следующим образом. В первой части представлено описание РРТС как вида групповой робототехники, перечислены специфические характеристики и свойства, в результате чего формализована обобщенная модель функционирования РРТС. На основе анализа литературных источников сформулирована классификация сценариев использования систем данного вида, в рамках которой выделен класс пространственно-распределенных задач. Во второй части проведено исследование ИБ РРТС, в рамках которого рассмотрены уязвимости систем данного вида, а также угрозы и механизмы реализации данных угроз. Сформулированы обобщенные модели угроз и нарушителя ИБ РРТС в процессе масштабирования численности агентов при выполнении пространственно-распределенных задач. Третья часть содержит анализ литературных источников, направленный на оценку актуального состояния проблемы обеспечения ИБ РРТС при внедрении вредоносных агентов и возможность использования рассмотренных решений в системах данного вида. В четвертой части представлены результаты количественной оценки влияния внедренных вредоносных агентов на функционирование РРТС в процессе масштабирования численности агентов при выполнении пространственно-распределенных задач. Представленная структура работы имеет несколько нетрадиционный вариант изложения материала, однако, по мнению авторов, именно такой способ организации элементов статьи позволяет максимально полно и последовательно ознакомить читателя с тематикой исследования, так как результаты и выводы, полученные в каждой последующей части, базируются непосредственно на результатах и выводах предыдущих частей.

1. Обобщенная модель функционирования РРТС и классификация сценариев использования систем данного вида. Роевая робототехника является относительно молодой областью исследований и постоянно развивается, однако в публикациях можно встретить такие термины, как «мультиагентные системы», «мультироботизированные системы» и «роевые робототехнические системы», которые часто используются в качестве синонимов. В работе [1] представлена систематизация и разграничение данных терминов. Так, мультиагентные системы представляют собой формализм, позволяющий описать не только робототехнические системы, но и любые информационные системы, состоящие из множества взаимодействующих элементов или подсистем. По этой причине данный термин представляет собой наиболее широкое понятие, которое включает в себя все прочие виды групповой робототехники.

Под мультироботизированными системами (МРС) понимаются такие системы, которые включают множество робототехнических устройств, в том числе сенсорные сети. МРС могут быть построены с использованием роботов на базе различных архитектур (гомогенные или гетерогенные роботы с различным структурно-функциональным исполнением и назначением), а также могут использовать принципы централизованного, децентрализованного или смешанного типа управления [2]. Так, например, использование термина МРС будет корректным для описания группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), группы промышленных манипуляторов на конвейерной линии, роботов-футболистов и т.д. Стоит отметить, что роботы, входящие в МРС, необязательно должны иметь одну общую цель и взаимодействовать друг с другом для ее достижения.

РРТС является частным случаем МРС, основным отличием является то, что перед системой ставится общая задача, которую роботы должны решить посредством взаимодействия друг с другом. При этом РРТС в классическом понимании должна обладать следующими свойствами:

- масштабируемость – система управления РРТС строится таким образом, чтобы обеспечить требуемое качество управления с неограниченным количеством роботов;
- децентрализованная система управления – ожидаемое поведение роботов достигается за счет использования принципов самоорганизации. Применение централизованного управления для РРТС накладывает ограничения на масштабируемость системы;
- простота технической реализации роботов – все роботы, входящие в состав РРТС, имеют ограниченные возможности вычислительных устройств, а также бортовых датчиков и сенсоров, что делает невозможным выполнить поставленную задачу с использованием только одного робота (в отличие от роботов с классическим исполнением. Под классическим исполнением робота понимается наличие максимально возможного бортового оснащения для выполнения широкого круга задач, например, антропоморфные роботы [3]);
- локальное взаимодействие роботов – выполнение поставленной перед РРТС задачи возможно только путем взаимодействия роботов друг с другом с использованием различных средств связи, при этом дальность их действия ограничена;
- гомогенность – роботы имеют идентичные структурные и функциональные характеристики (габаритные размеры, наличие нескольких вычислительных платформ, наличие бортовых специализированных исполнительных устройств, датчиков и сенсоров);
- автономность – ввиду отсутствия единого управляющего центра каждый робот самостоятельно принимает решение о своих дальнейших действиях, опираясь на доступную ему информацию.

Иллюстрация иерархии рассмотренной терминологии представлена на рисунке 1.

Преимуществами РРТС по сравнению с робототехническими системами с классическим исполнением являются [4, 5]:

- экономическая эффективность применения большого количества технически простых роботов с сопоставимыми показателями качества решения поставленной задачи;
- возможность достижения требуемых показателей качества решения поставленной задачи за счет варьирования численности роботов в зависимости от сложности задачи;
- высокая надежность системы и устойчивость к воздействиям среды функционирования.

В большинстве исследований в области групповой робототехники, в том числе в РРТС, рассматривается следующий типовой сценарий функционирования роботов (далее «агентов»). Имеется множество агентов $R = 1, \dots, n$ и множество задач $O = 1, \dots, m$. Агенты получают от оператора по каналу связи c данные о задачах и совместно приступают к их выполнению, при этом выполнение задач является последовательным. То есть после выполнения первой задачи агенты выбирают вторую и переходят к ее выполнению. Такая последовательность действий повторяется до тех пор, пока не будут выполнены все m задач. В теоретических исследованиях данный типовой сценарий часто называется задачей коллективного управления группой роботов [6] или задачей обеспечения коллективного поведения группы роботов [7]. С точки зрения практической реализации это может быть задача совместной транспортировки груза группой роботов [8].

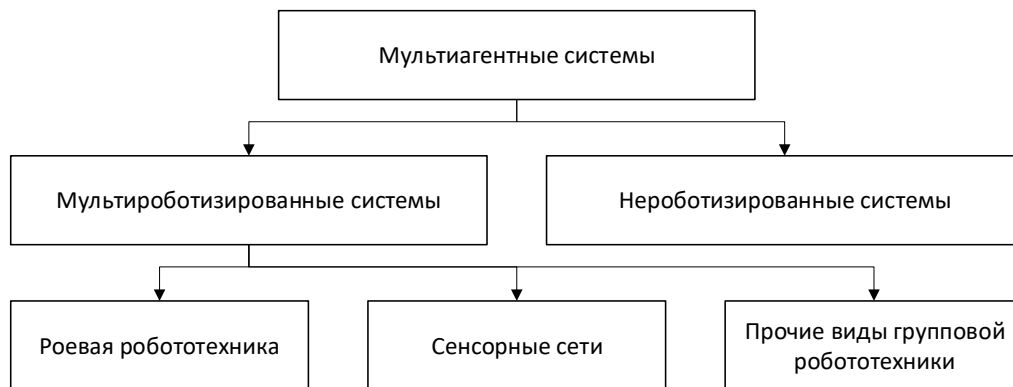


Рисунок 1 – Иерархическое представление терминов, используемых в групповой робототехнике

В последнее время появилось множество исследований, в которых сценарий использования РРТС существенно отличается от вышеописанного сценария [9–11]. Аналогично типовому сценарию, имеется множество агентов R и множество задач O . Здесь и далее для краткости множество задач O будем называть «заданием» агентов РРТС. Агенты РРТС получают задание от оператора по каналу связи, после чего перед непосредственным выполнением задач осуществляется процедура распределения задач. В результате выполнения данной процедуры за каждым из агентов будет закреплена по меньшей мере одна задача. Распределение задач может быть описано следующим соотношением [12]:

$$A: O \rightarrow R, \quad (1)$$

где A – прямоугольная матрица с элементами $A_{j,i}$; $A_{j,i} = 1$, если задача o_j закрепляется за агентом r_i , и $A_{j,i} = 0$ в противном случае.

Основные ограничения процедуры распределения задач заключаются в ограниченных ресурсах выполнения задачи и времени выполнения задачи:

- выполнение задач должно иметь строгую последовательность, то есть время начала следующей задачи T_{j+1} не должно пересекаться с временем завершения выполнения текущей задачи T_j . Общее время выполнения задачи состоит из времени начала задачи (получение задания от оператора) T_j , времени ожидания перед выполнением задачи (процедура распределения задач) W_j и продолжительности выполнения задачи (планирование пути перемещения и управления движением агента) M_j :

$$T_{j+1} \geq T_j + W_j + M_j; \quad (2)$$

- каждая задача o_j может быть назначена только одному агенту r_i :

$$\sum_{r_i \in R} T_j = 1, \forall o_j \in O. \quad (3)$$

Цель процедуры распределения задач (ПРЗ) состоит в определении соответствий между элементами множеств R и O таким образом, чтобы обеспечить требуемое качество функционирования РРТС по показателям $Q = q_1, \dots, q_k$, где k – количество показателей эффективности. В качестве таких показателей могут рассматриваться, например, время выполнения задания, расход аккумуляторной батареи агентов

РРТС, количество выполненных задач за ограниченный промежуток времени [13] и т.д. Формальная постановка задачи РРЗ выглядит следующим образом: обеспечить такой результат распределения задач O между агентами РРТС R при ограничениях (2), (3), что

$$A: R, O, Q \rightarrow \{\Delta q_1, \dots, \Delta q_k\} \mid \forall \Delta q_l > 0, q_l \in Q, l = 1, \dots, k. \quad (4)$$

После процедуры распределения задач каждый агент r_i приступает к планированию и выполнению списка закрепленных за ним задач g_i :

$$g_i = \{o_{j,1}, o_{j,2}, \dots, o_{j,h}\}, \quad (5)$$

где h – количество задач, закрепленных за агентом r_i .

Процедура планирования выполнения задач (ПВЗ) основывается на классической задаче планирования пути (ПП), которую можно описать следующим образом. Необходимо найти последовательность опорных (промежуточных) точек пути $p = \{p_s, p_0, p_1, \dots, p_g\}$ между текущей позицией агента p_s и целевой p_g так, чтобы обеспечить требуемое качество функционирования РРТС по показателям Q . В случае процедуры ПВЗ в качестве опорных точек пути выступает список задач, закрепленных за агентом:

$$p_i = \{p_s, g_i\}. \quad (6)$$

В процессе функционирования агентов РРТС последовательность задач множества p_i может быть изменена с целью увеличения эффективности функционирования РРТС. Процедура планирования выполнения задач имеет вид, отличный от задачи планирования пути: для каждого агента r_i необходимо найти такую последовательность выполнения задач P согласно p_i , что

$$P: r_i, p_i, Q \rightarrow \{\Delta q_1, \dots, \Delta q_k\} \mid \forall \Delta q_l > 0, q_l \in Q, l = 1, \dots, k. \quad (7)$$

Рассмотрим процедуру выполнения задачи (ВЗ) агентом РРТС. Децентрализация системы управления РРТС предполагает, что каждый агент r_i самостоятельно принимает решение о своих действиях в данный момент времени $a_i(t)$ [14.] Каждое следующее действие агента $a_i(t+1)$ зависит от следующих параметров:

- вектор состояния агента $s_i(t)$, компонентами которого могут быть текущие координаты, заряд аккумуляторной батареи, скорость, ускорение и т.д.;
- вектор состояния среды $e_i(t)$, компонентами которого могут быть переменные, определяющие наличие в области видимости агента препятствий, других агентов, задач и т.д.

Таким образом, выбор действия E агентом РРТС в следующий момент времени может быть описан выражением:

$$E: s_i(t), e_i(t), Q \rightarrow a_i(t+1). \quad (8)$$

Итоговая эффективность функционирования РРТС может быть представлена в виде зависимости целевого функционала Y от результатов выполнения процедур РРЗ, ПВЗ и ВЗ:

$$Y \leftarrow A, P, E. \quad (9)$$

Информацию о состоянии среды агент собирает с использованием бортовых датчиков и сенсоров, а также посредством информационного обмена с другими агентами РРТС. Каждый агент получает информацию по каналу связи c лишь от нескольких соседних агентов, расположенных в области видимости b_i агента r_i , то есть в области пространства, ограниченного окружностью с радиусом L . Иллюстрация информационного обмена между агентами РРТС, а также между агентами и оператором представлена на рисунке 2, где символами O_p и L' обозначены оператор РРТС и дальность действия телекоммуникационных устройств центра управления (ЦУ) соответственно. На практике значение L' может существенно превышать область видимости агентов L , так как в отличие от агентов РРТС производительность оборудования ЦУ не лимитирована вычислительными или энергетическими ресурсами.

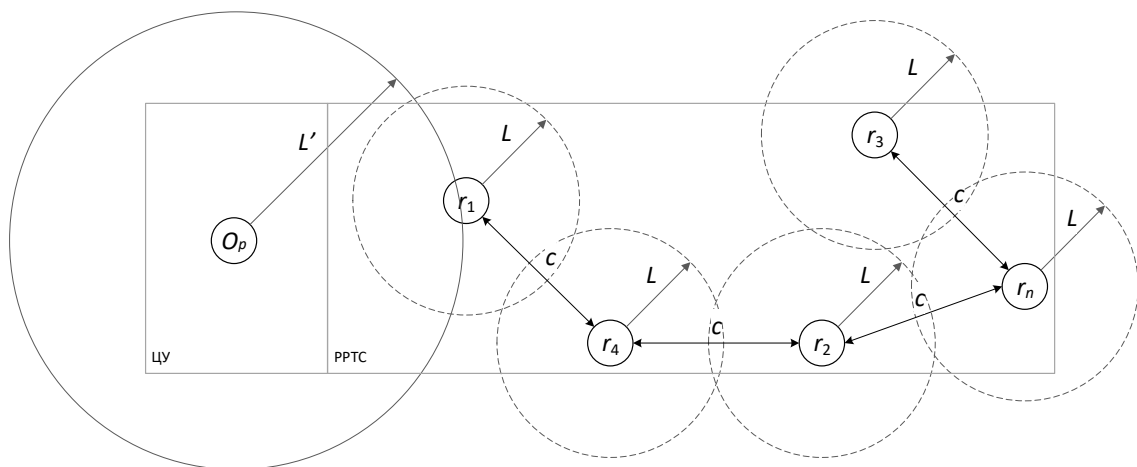


Рисунок 2 – Иллюстрация информационного обмена в РРТС

Исходя из этого, двухсторонний информационный обмен между оператором и агентами РРТС возможен только в том случае, когда расстояние между РРТС и оператором d не превышает радиус видимости агентов L . В том случае, когда $L < d \leq L'$, то есть агенты находятся на некотором расстоянии от оператора, но в пределах действия телекоммуникационных устройств ЦУ, информационный обмен носит односторонний характер – от оператора к агентам РРТС. Агенты РРТС могут принимать данные от оператора (без возможности подтверждения получения сообщения), а также осуществлять информационный обмен друг с другом. Данные, которые отправляет оператор агентам РРТС, могут содержать как информацию о задании (множество задач O), так и любые другие необходимые инструкции для выполнения задания, за исключением конкретных управляющих сигналов для исполнительных устройств агентов (в отличие от ЦУ при централизованной стратегии управления). В том случае, если $d > L'$, агенты РРТС переходят в полностью автономное функционирование. При необходимости обратной связи с оператором, например, в результате выполнения задания или при возникновении внештатной ситуации, агентам РРТС необходимо вернуться в окрестность ЦУ. Также канал обратной связи с оператором может быть организован «по цепочке» между агентами, находящимися в области видимости друг друга, при условии нахождения хотя бы одного агента на расстоянии от ЦУ, не превышающем область видимости бортовых средств связи агента. Однако возможность реализации такого канала ограничена спецификой задания, которое выполняют агенты РРТС.

Информационный обмен между агентами РРТС осуществляется посредством широкополосной или групповой рассылки сообщений. Так как дальность действия бортовых средств связи агентов РРТС ограничена, то агент, сгенерировавший сообщение, рассылает его агентам в своей области видимости, после чего соседние агенты пересылают сообщения далее «по цепочке», то есть выступают ретрансляторами. Данный подход, с одной стороны, приносит в информационный обмен избыточность данных, а с другой стороны, компенсирует нестабильность каналов связи, что особенно актуально при функционировании агентов РРТС в недетерминированных или агрессивных средах.

Схематически процесс управления агентами РРТС представлен на рисунке 3, где t_0 означает момент получения задания от оператора, t_f – момент завершения выполнения задания, а t_b – момент передачи сообщения (отчета) оператору. С учетом ограниченной области видимости агентов РРТС, в том случае, если выполнение задания предполагает удаление агентов на расстояние $d > L'$, то отрезок времени между моментами t_f и t_b предполагает перемещение агентов в окрестность ЦУ для передачи данных оператору.

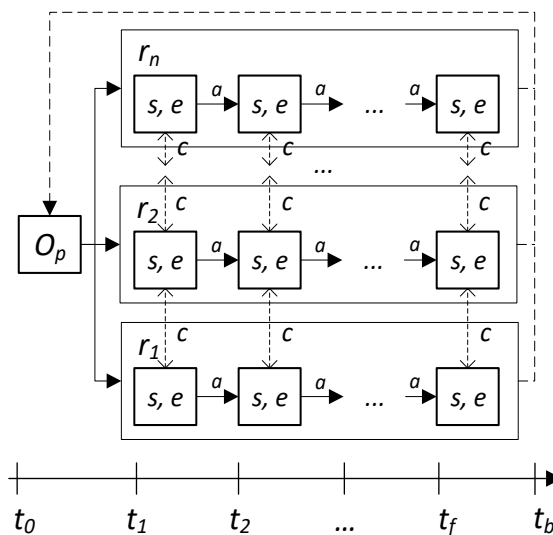


Рисунок 3 – Схематическое представление процесса управления РРТС

Таким образом, основное отличие рассмотренного сценария заключается в том, что агенты РРТС выполняют задачи не последовательно, а параллельно, что требует обязательного использования процедуры распределения задач между агентами РРТС. Такой подход позволяет существенно сократить время выполнения задания РРТС. На практике к подобным задачам можно отнести, например, мониторинг большой территории с целью поиска лесных пожаров [15] или объектов/людей после чрезвычайного происшествия [16]. В описанных задачах предполагается, что площадь рабочей области РРТС $S(O)$ существенно превышает площадь охвата бортовых датчиков и сенсоров агентов РРТС с учетом их области видимости b_i , то есть $S(O) > \sum S(b_i)$. Исходя из этого, данный сценарий предлагается называть пространственно-распределенной задачей. Блок-схема обобщенного сценария выполнения РРТС пространственно-распределенной задачи показана на рисунке 4.

На рисунке 4 блок 1 соответствует процедуре информационного обмена, инициированного оператором, в результате выполнения которой агенты РРТС получают задание O . Блоки 2–4 соответствуют процедурам ПРЗ, ПВЗ и ВЗ, описанным ранее. Блок 5 представляет собой процедуру информационного обмена между агентами РРТС с целью получения информации о состоянии ближайших агентов и возможности выполнения закрепленных за ними задач. В случае невозможности выполнения задачи определенным агентом, процедура ПРЗ повторяется, то есть осуществляется перераспределение задач и корректировка последовательности их выполнения каждым агентом. Блок 6 аналогичен блоку 1 с той разницей, что инициализацию информационного обмена осуществляют агенты РРТС с целью предоставления информации о результатах выполнения задания. Блок 7 представляет собой процедуру самодиагностики агента на предмет исправности бортовых датчиков и сенсоров, исполнительных устройств, а также уровня заряда аккумуляторной батареи. Эта процедура также выполняется на пятом этапе представленной блок-схемы для получения текущего состояния агента (блок 5 раскрывает особенности коллективного поведения агентов в случае неисправности, а блок 7 – индивидуального). При невозможности продолжения функционирования агент посылает соседним агентам и оператору соответствующее сообщение и отправляется в ЦУ для последующего ремонта или зарядки. Данный блок размещен в конце блок-схемы, так как предполагается, что перед началом функционирования агента его диагностику проводит обслуживающий персонал или оператор. А в процессе функционирования агента процедура самодиагностики может выполняться через заданный промежуток времени.

Одним из ключевых преимуществ использования РРТС является возможность масштабирования количества агентов как при увеличении сложности задания (например, увеличение площади территории, на которой необходимо осуществить мониторинг или разведку для сбора данных) [17], так и в случае неисправности или выхода из строя одного или нескольких агентов.

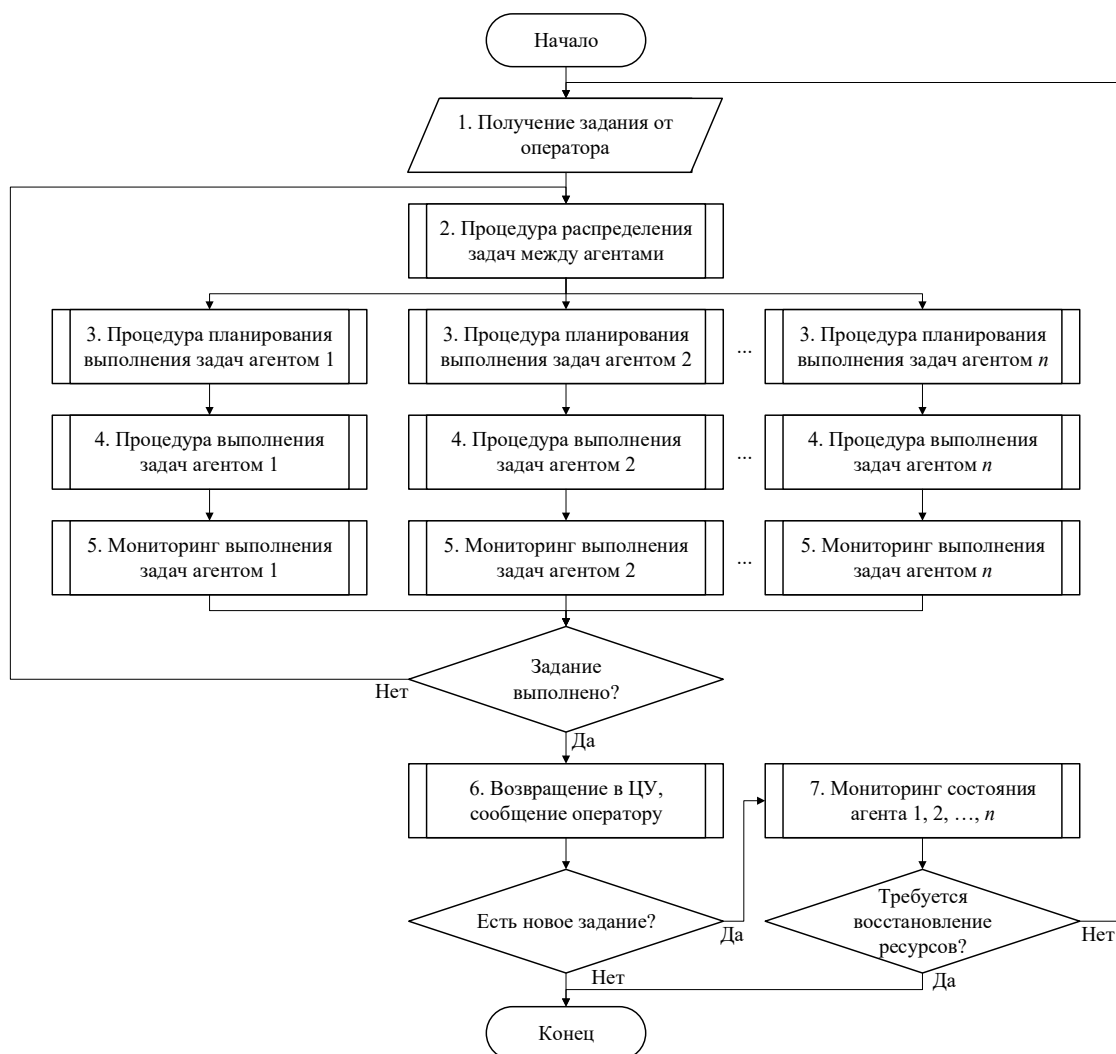


Рисунок 4 – Блок-схема обобщенного сценария выполнения РРТС пространственно-распределенной задачи

Дополнительно привлеченные агенты могут быть как направлены оператором из ЦУ, так и переназначены в ходе выполнения ранее закрепленной за агентом задачи с меньшим приоритетом важности (при условии нахождения агентов в области видимости средств связи ЦУ). Процесс масштабирования численности агентов РРТС R может быть представлен как объединение двух множеств:

$$R = R_1 \cup R_2, \quad (10)$$

где R_1 – исходное множество агентов РРТС; R_2 – множество привлеченных агентов. При необходимости масштабирования численности агентов R переназначение привлеченных агентов R_2 осуществляется оператором при формировании задания O на первом этапе блок-схемы, представленной на рисунке 4. Возможна ситуация, когда требуемое для масштабирования системы количество агентов в ЦУ отсутствует, тогда привлечение новых агентов осуществляется в процессе выполнения задания агентами РРТС R_1 . Передача информации о задании осуществляется посредством информационного обмена между агентами, и в этом случае в качестве оператора в блоке 1 рисунка 4 выступает тот агент множества R_1 , который передал данные агенту множества R_2 . Далее привлеченные агенты функционируют согласно блокам 2–7 обобщенного сценария выполнения РРТС пространственно-распределенной задачи.

2. Обобщенные модели угроз и нарушителя ИБ РРТС в процессе масштабирования численности агентов при выполнении пространственно-распределенных задач. В работах [18, 19] рассмотрены общие уязвимости информационной безопасности МРС, в число которых входят:

- децентрализованное управление МРС;
- пространственная удаленность агентов МРС и нахождение их вне пределов контролируемой территории;
- необходимость использования телекоммуникационных технологий для обмена информацией между агентами системы;
- ограниченность информации агентов обо всей системе;
- непредсказуемая динамика среды функционирования.

Перечисленные уязвимости характерны и для РРТС ввиду специфики архитектуры систем данного вида, а также ввиду особенностей функционирования при выполнении пространственно-распределенных задач. Выявленные уязвимости РРТС делают возможным возникновение и реализацию следующих угроз информационной безопасности [20]:

- несанкционированный перехват сообщений в процессе информационного обмена между агентами;
- нарушение целостности данных, передаваемых в процессе информационного обмена между агентами;
- несанкционированный доступ к данным;
- отказ в обслуживании;
- перехват данных с последующей их модификацией и воспроизведением.

К основным механизмам атак на РРТС, формирующим рассмотренные угрозы, относятся [18, 20, 21]:

- атаки на каналы связи;
- сложность идентификации и аутентификации в РРТС ввиду отсутствия идентификаторов у агентов и отсутствия информации обо всех агентах системы;
- внедрение «вредоносных» агентов, которыми могут быть захваченные и перепрограммированные злоумышленником агенты РРТС.

В разрезе процесса масштабирования численности агентов РРТС наиболее значимым из рассмотренных механизмов атак можно считать внедрение вредоносных агентов, задачей которых является недопущение или снижение эффективности выполнения задания РРТС. Данный механизм реализуется путем внедрения вредоносного агента в состав РРТС для формирования множества сообщений при информационном обмене, которые приводят к снижению эффективности принимаемых агентами решений $a(t + 1)$, что затрудняет приращение целевого функционала.

В работах [16–18] рассмотрены и считаются наиболее перспективными следующие виды атак на РРТС:

- перехват вредоносным агентом сообщений с последующей их модификацией и воспроизведением (атаки Man in the Middle);
- генерация и передача вредоносным агентом ложных данных о собственном состоянии, состоянии среды и выбранных действиях, направленных на уменьшение приращения целевого функционала ΔU .

В работах [19, 22] перечисленные атаки относят к классу «мягких атак», особенностью которых является отсутствие явно идентифицируемых признаков нарушения ИБ РРТС, так как при вредоносном воздействии, с одной стороны, все подсистемы агентов функционируют в штатном режиме, а с другой стороны, агенты не могут выявить факт уменьшения эффективности принимаемых действий.

Потенциальные нарушители ИБ РРТС могут быть разделены на два типа с точки зрения наличия возможности постоянного или разового доступа к агентам РРТС:

- нарушители, не имеющие права доступа к агентам РРТС, – внешние нарушители;
- нарушители, имеющие права доступа к агентам РРТС, – внутренние нарушители.

К внутренним нарушителям ИБ РРТС можно отнести лиц, привлеченных к разработке и обслуживанию РТС, которые используются в составе РРТС:

- проектировщики;
- разработчики программно-аппаратной части системы управления;
- операторы;
- обслуживающий персонал (например, сотрудники, производящие калибровку датчиков, настройку параметров программной части системы управления, ремонтные работы РТС и т.д.).

Внутренние нарушители могут оказывать влияние как на программную, так и аппаратную часть системы управления агентов РРТС. Исходя из этого, угрозы, исходящие от данной группы нарушителей, совпадают со списком всех рассмотренных угроз ИБ РРТС.

Внешние нарушители способны оказать воздействие преимущественно на аппаратную составляющую системы управления агента РРТС (нарушение работы датчиков и сенсоров РРТС, каналов связи). Воздействие на программную составляющую системы управления агентов РРТС требует от нарушителя понимания принципов построения децентрализованных систем управления, протоколов и алгоритмов функционирования агентов, навыков программирования на низкоуровневых языках программирования, а также достаточное количество времени для внесения изменений в определенный модуль системы управления агента РРТС (например, при физическом захвате агента и попытке его перепрограммировать). Только в этом случае угрозы от данной группы нарушителей будут совпадать со списком всех рассмотренных угроз ИБ РРТС.

Обобщенные модели угроз и нарушителя ИБ РРТС, приведенные в данном разделе, носят декларативно-описательный характер. Это обусловлено тем фактом, что данные модели построены на основе концептуального описания РРТС как архитектуры робототехнической системы без учета конкретных характеристик устройств, входящих в состав системы. Таким образом, приведенные результаты не могут рассматриваться как завершённые самостоятельные документы, однако могут быть использованы в качестве абстрактных шаблонов или вспомогательной информации при разработке моделей для конкретной робототехнической системы.

3. Актуальное состояние проблемы обеспечения ИБ РРТС при внедрении вредоносного агента. В настоящее время известен ряд исследований, направленных на обеспечение информационной безопасности МРС. Разработано множество подходов, моделей и методов, позволяющих либо уменьшить ущерб от реализации угроз, либо уменьшить вероятность их реализации. Рассмотрим результаты этих исследований с точки зрения возможности их применения в РРТС.

В статье [19] рассмотрен вопрос информационной безопасности робототехнических комплексов с роевым интеллектом. В данной работе рассматривается класс поведенческих алгоритмов, в частности муравьиный алгоритм поиска кратчайшего пути [23]. Поведенческие алгоритмы, по сути, являются оптимизационными, то есть направлены на повышение эффективности системы по определенному критерию, поэтому будем считать, что описанная уязвимость характерна для всего класса алгоритмов подобного рода, например, алгоритм роя частиц [24], пчелиный алгоритм [25] и т.д. В работе описана атака типа «ложный путь», направленная на сенсорное восприятие роботами группы наилучшей альтернативы (предоставление ложной информации о стоимости того или иного пути). Продемонстрирован пример численного моделирования данной атаки, согласно которой воздействие одного вредоносного агента практически несущественно, но если соотношение вредоносных и обычных агентов в группе будет приближаться 1 к 1, то вероятность выбора группой роботов рационального пути существенно уменьшается. На основе этого исследования тем же коллективом авторов предложена модель безопасности мобильных мультиагентных робототехнических систем с коллективным управлением на основе полицейских участков (англ. POM – police office model) [26] и ее модификация [27]. Согласно этой идее, группа роботов изначально проектируется как гетерогенная группа, в которой часть агентов выполняют задачу обеспечения ИБ. Рабочая область группы роботов декомпозируется на ряд зон, для которых вводится зональная и межзональные процедуры безопасности. Недостатком такого подхода с точки зрения РРТС является сложность формирования полицейских участков как ввиду высокой масштабируемости системы, так и возможной пространственной рассредоточенности агентов при функционировании в недетерминированной среде.

В работе [22] представлен ряд методов, направленных на повышение эффективности обнаружения нарушений семантической целостности информации в группах беспилотных транспортных средств (БТС) для обеспечения их безопасного информационного взаимодействия в процессе функционирования. Основная идея заключается в комбинации репутационных механизмов и подхода, предполагающего формирование временных подгрупп БТС, один из которых будет выполнять оценку целостности информации. Данная идея имеет некоторое сходство с моделью полицейских участков и аналогичные недостатки применительно к РРТС.

В ряде исследований [28–30] рассмотрена задача выявления вредоносных роботов при их воздействии на коллективное принятие решений в процессе функционирования РРТС. Согласно полученным результатам, достаточно одного вредоносного агента для формирования цепных реакций в процессе достижения консенсуса для снижения эффективности функционирования всей системы. Авторами работы рассмотрены

задачи, направленные на обеспечение ИБ процесса достижения консенсуса относительно выбора наилучшей альтернативы. В работе предложен критерий уверенности агента, который позволяет после n -й итерации выявить вредоносного агента и предпринять меры для обеспечения ИБ РРТС. Недостатком данного подхода является тот факт, что разработанные методы направлены на анализ поведения агентов, что требует некоторого времени для сбора данных об агентах и расчета показателя уверенности. Согласно представленной на рисунке 3 схеме управления РРТС при выполнении пространственно-распределенной задачи вредоносный агент может осуществить атаку на первом шаге функционирования РРТС, что приведет к неэффективному распределению задач и последующему уменьшению целевого функционала.

Авторами статьи [31] рассмотрены уязвимости и угрозы безопасности роя дронов, проанализированы различные стратегии взлома роя дронов, разработан ряд предложений и рекомендаций по повышению безопасности использования БПЛА и дронов. Среди предложенных решений рассматриваются различные методы, включая нейронные сети и системы предотвращения вторжений на основе нечеткой логики. Однако основное внимание уделено аппаратной составляющей системы управления БПЛА без учета их программной составляющей.

В работе [32] представлен набор методов для обеспечения информационной безопасности систем управления группой роботов на основе анализа поведения роботов и вычисления уровня доверия к ним. Предложенные решения позволяют формировать доверительные отношения между роботами и выявлять аномальное поведение вредоносных роботов, внедренных в группу. Стоит отметить, что данное решение предполагает наличие в группе роботов лидера, обеспечивающего эффективность выполнения задания. Такой подход позволяет использовать разработанные методы для групп роботов с централизованным и смешанным типом управления, а для децентрализованного типа управления – только в случае выполнения задач коллективного движения, так как все роботы группы находятся на относительно малом расстоянии друг от друга и попадают в область видимости других роботов. Таким образом, данное решение невозможно использовать для РРТС при выполнении пространственно-распределенных задач без модификации, например, путем выделения ряда подгрупп агентов РРТС с локальными лидерами на основе оценки расстояния между агентами. Однако эффективность такой модификации будет сильно зависеть как от площади рабочей области, так и от количества агентов РРТС, так как возможна такая ситуация, что в определенный момент времени при выполнении задач отдельные подгруппы будут состоять лишь из одного агента.

В работе [33] рассматривается задача выявления и идентификации угроз нарушения ИБ МРС. В рамках решения данной задачи предложен ряд методов, направленных на минимизацию времени выявления информационных воздействий вредоносных агентов. Основная идея заключается в формировании шаблонов эталонного и аномального поведения агентов на основе косвенных признаков (скорость, ускорение и т.д.). К недостаткам данного решения можно отнести необходимость формирования базы данных аномального поведения с учетом особенностей аппаратной реализации агентов, а также необходимость нахождения агентов в области видимости друг друга для своевременного выявления вредоносного поведения, что не всегда обеспечивается в случае выполнения пространственно-распределенных задач.

В статье [34] представлен метод идентификации вредоносных агентов в РРТС на основе анализа истории действий агентов, которые встречаются в процессе выполнения задания. В качестве основного задания рассматривается задача перемещения агентов для формирования топологии регулярной решетки на заданной области. Исходя из этого, авторы работы вводят допущение, что каждый агент встретится с 8 ближайшими соседними агентами с некоторой вероятностью, что, в свою очередь, сделает возможным своевременно выявить вредоносного агента. Представлен численный эксперимент, подтверждающий работоспособность предложенного решения. Однако применимость данного метода ограничена задачами коллективного движения, а эффективность решения при выполнении агентами РРТС пространственно-распределенных задач требует дополнительных экспериментальных исследований.

Рассмотренные методы направлены на выявление вредоносных агентов после факта их внедрения в состав РРТС. Однако в литературе встречается ряд решений, направленных на разработку технологий аутентификации и авторизации агентов РРТС, позволяющих минимизировать количество внедренных вредоносных агентов. Так, в рамках проведенного аналитического обзора по данной тематике, авторы работы [35] выделяют данную задачу как одну из важнейших проблем обеспечения комплексной ИБ РРТС, при этом отмечают сложность ее реализации ввиду отсутствия идентификаторов у агентов. В качестве одного из перспективных вариантов решения задачи авторами предложено использовать групповой идентификатор агентов, например, на основе выданного оператором задания. Однако данная идея не получила дальнейшего развития авторами статьи.

Авторы работы [36] провели исследование и оценку эффективности обеспечения информационной безопасности РРТС, состоящей из 3 БПЛА, при наличии внешних информационных воздействии в процессе коммуникации каждого из агентов с центром управления. Эксперимент был проведен в среде моделирования Gazebo [37] с использованием средств аутентификации, встроенных в фреймворк ROS2 (англ. «Robotic operation system» – робототехническая операционная система) [38]. Результаты проведенных исследований подтвердили эффективность применения данного инструмента, но его использование вызвало задержку при передаче данных между сторонами, что существенно увеличило время симуляции.

Работа [39] направлена на повышение эффективности выполнения задания группой БПЛА путем модификации инерциальной системы навигации и обеспечения защищенной передачи измерений данной системы другим БПЛА. Данный подход позволит оптимально осуществлять планирование пути перемещения агентов в динамических средах с множеством препятствий, а также в агрессивных средах, которые предполагают возможность воздействия злоумышленника на информационный обмен между БПЛА. Авторы предложили гибридную криптосистему, включающую процедуру аутентификации по подписи с использованием алгоритма RSA. Основной акцент в работе авторами сделан на модификацию инерциальной системы навигации БПЛА, вследствие чего оценка эффективности обеспечения информационной безопасности не приведена. Также авторами упоминается, что обеспечение работы предложенного решения в реальном масштабе времени возможно при использовании дополнительного аппаратного обеспечения, что требует проведения экспериментальных исследований, направленных на оценку возможности применения данного решения в условиях ограниченных вычислительных платформ агентов РРТС.

В работе [40] представлен протокол взаимной аутентификации для группы БПЛА на основе механизма вычисления репутации и доверия. Авторы подтвердили работоспособность предложенного решения путем проведения серии экспериментов с 20 БПЛА с наличием от 10 до 40 процентов вредоносных агентов. К особенностям данного протокола можно отнести обязательное требование наличия индивидуальных идентификаторов у агентов, что затрудняет использование данного решения без его модификации. К подобной модификации можно отнести, например, использование технологии блокчейн [41] для закрепления идентификатора за каждым агентом РРТС. Такой подход, с одной стороны, позволит использовать методы и протоколы аутентификации с обязательным наличием идентификаторов для РРТС, а с другой стороны, увеличит вычислительную сложность решения, что не всегда допустимо.

4. Количественная оценка влияния нарушителя на функционирование РРТС в процессе масштабирования численности агентов при выполнении пространственно-распределенных задач.

4.1. Постановка задачи проведения эксперимента. В качестве пространственно-распределенной задачи рассмотрим задачу поиска пострадавших людей в результате чрезвычайного происшествия для их последующего спасения [16]. Допустим, что имеется некоторая территория, на которой определено множество задач $O = 1, \dots, m$. Будем считать, что каждая задача $o_j \in O$ содержит координаты пространства, в котором потенциально находятся пострадавшие люди. Тогда каждому агенту из множества $R_1 = 1, \dots, n$ необходимо переместиться в определенную область и провести мониторинг с помощью бортовых сенсоров, например, устройства видеозаписи. После этого необходимо вернуться на базу и передать собранные данные оператору для дальнейшей обработки и принятия решений по проведению дальнейших поисково-спасательных мероприятий.

Допустим, количество агентов n множества R_1 меньше количества задач m , что не позволяет распределить задачи между агентами и выполнить задание. Тогда оператор привлекает дополнительное множество агентов R_2 численностью $z = m - n$ агентов, а общее количество агентов системы становится равным $n + z$. Целевая функция заключается в оптимизации выбора задач агентами РРТС таким образом, чтобы минимизировать время выполнения задания. При этом общим временем выполнения задания будем считать максимальное время выполнения задачи отдельным агентом:

$$T = \max(t_i(o_j)) \rightarrow \min, i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

где $t_i(o_j)$ – время, необходимое для выполнения закрепленных за агентом РРТС задач.

Далее, согласно обобщенному сценарию выполнения РРТС пространственно-распределенной задачи, система численностью n агентов, находясь в ЦУ, получает задание O от оператора по каналу связи. После этого агенты РРТС в автономном режиме осуществляют распределение задач и их выполнение с последующим возвращением в ЦУ для передачи собранных данных оператору и получения следующего задания O_{next} .

Предположим, что среди множества агентов R_2 может быть некоторое количество вредоносных агентов \hat{z} . Под поведением вредоносного агента будем понимать выбор наиболее удаленной задачи для выполнения в процессе ПРЗ, при этом выполнять задачу агент не будет (вредоносный агент остается на исходной позиции, не влияя явно на показатель T). Аналогичное поведение вредоносных агентов рассмотрено в эксперименте в работе [42], однако количественные показатели влияния внедренных вредоносных агентов не представлены. С учетом описанного поведения вредоносных агентов и ограниченных возможностей аппаратной реализации агентов РРТС вводим допущение, что энергетический ресурс агентов позволяет выполнить не более 2 задач из общего списка. В ходе выполнения задания первый освободившийся агент РРТС запрашивает у соседних агентов статус выполнения задач, в результате чего выявляется задача, не закрепленная ни за одним из агентов. Тогда этот агент выбирает дополнительную задачу для выполнения. В результате целевая функция будет зависеть от времени выполнения всех задач, закрепленных за агентом:

$$T' = \max(t_i(g_i)) \rightarrow \min, i = \overline{1, n}. \quad (12)$$

С позиции информационной безопасности задача исследования заключается в том, чтобы определить уменьшение целевого функционала ΔT выполнения задания РРТС при воздействии внедренных вредоносных агентов:

$$\Delta T = T' - T. \quad (13)$$

4.2. Результаты эксперимента. Для проведения эксперимента была выполнена программная реализация на языке программирования Python. Визуализация пути перемещения агентов РРТС, а также формирование графиков для оценки влияния вредоносных агентов выполнены с помощью библиотеки Matplotlib. При проведении симуляции был использован компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Core i7-8550U с тактовой частотой 1,8 ГГц, 8 ГБ оперативной памяти. Используются параметры моделирования, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры моделирования

Наименование параметра	Значение
Количество агентов РРТС, n	10, 50, 100
Количество вредоносных агентов, \hat{z}	0, 1, 25 %, 50 %
Количество экспериментов	100
Количество задач, m	10, 50, 100
Скорость перемещения агентов	0,5 м/с
Размер карты	60 x 60 м

На рисунке 5 представлены примеры экспериментов без вредоносных агентов (рис. 5а), с 1 вредоносным агентом (рис. 5б), с 3 вредоносными агентами (рис. 5в) и с 5 вредоносными агентами (рис. 5г).

На рисунке 5 цветные точки обозначают исходные позиции агентов РРТС, а серые квадраты – позиции задач. Цветные сплошные линии обозначают пути перемещения агентов РРТС, а пунктирные линии (рис. 5б–г) – предполагаемые пути вредоносных агентов к закрепленным за ним задачам. Оси на представленном рисунке определяют размерность карты.

В случае отсутствия вредоносных агентов процедура распределения задач выполнялась один раз, в результате чего за каждым из агентов было закреплено по одной задаче. В качестве алгоритма распределения задач использован метод на основе жадного алгоритма [43].

При наличии вредоносных агентов в РРТС процедура распределения задач выполнялась дважды: первый раз при получении списка задач от оператора, а второй раз – после выполнения первой задачи. Таким образом, некоторые пути перемещения агентов представляют собой ломанные линии, как показано на рисунках 5б–г.

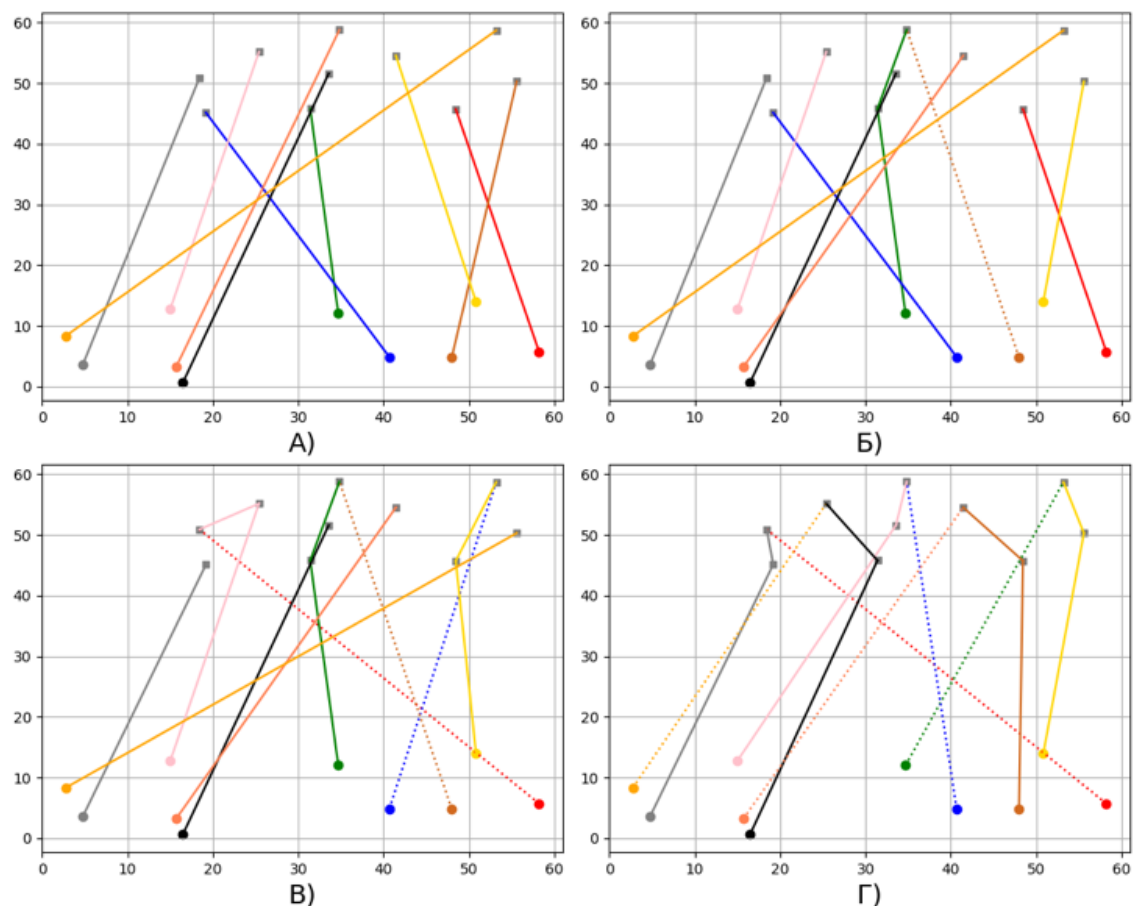


Рисунок 5 – Пример выполнения задания РРТС из 10 агентов: а) без вредоносных агентов; б) с 1 вредоносным агентом; в) с 3 вредоносными агентами; г) с 5 вредоносными агентами

На рисунках 6–8 показаны результаты моделирования выполнения задания РРТС численностью 10, 50 и 100 агентов соответственно, где полупрозрачные линии демонстрируют результаты отдельных экспериментов, а непрозрачные линии представляют собой линии тренда.

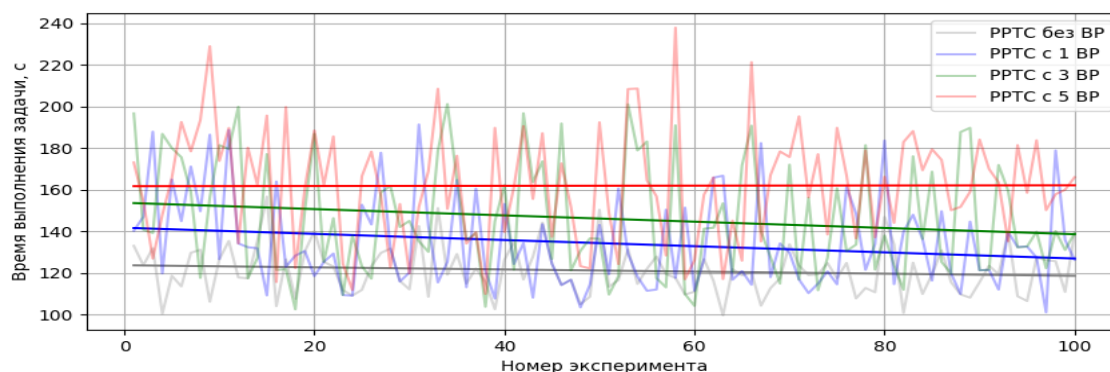


Рисунок 6 – Результаты выполнения задания РРТС из 10 агентов

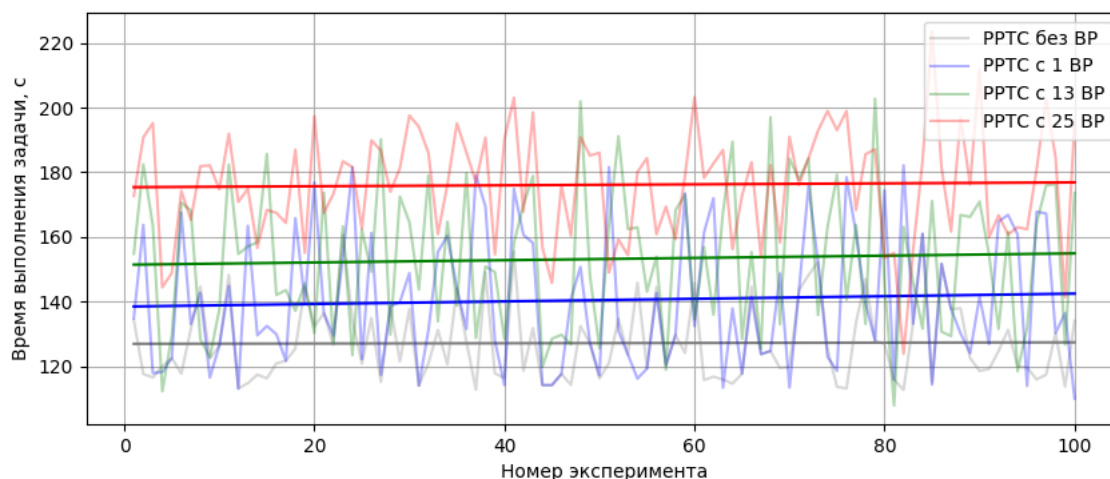


Рисунок 7 – Результаты выполнения задания РРТС из 50 агентов

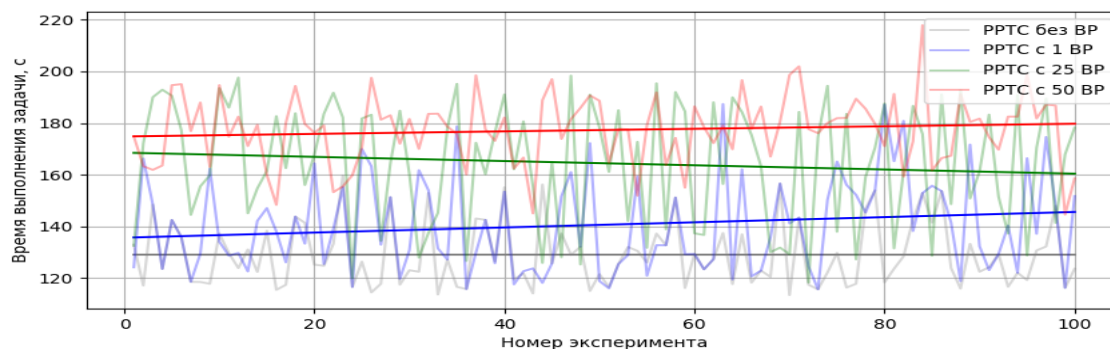


Рисунок 8 – Результаты выполнения задания РРТС из 100 агентов

При оценке времени выполнения задания РРТС в данной работе не учитывались кинематические характеристики агентов РРТС, а также возможность столкновения агентов друг с другом, что требует маневрирования, тем самым увеличивая продолжительность выполнения задачи. Таким образом, общее время выполнения задания считается максимальной продолжительностью выполнения задачи отдельным агентом, который движется с постоянной скоростью. Также стоит отметить, что в реальной системе также итоговое время будет несколько больше, так как не учитывается время, затраченное на выполнение процедуры распределения задач, и не учитывались задержки в каналах связи в процессе информационного обмена между агентами РРТС.

Для оценки влияния вредоносных агентов на результат функционирования РРТС интерес также представляют максимальные, средние и минимальные значения показателей эффективности выполнения задания, представленные в таблице 2. Согласно полученным результатам, при наличии 1 вредоносного

агента среднее время выполнения задания РРТС увеличивается до 8,23 % (129,08 с против 140,67 с). При этом в реальных условиях использования РРТС необходимо учитывать, что подобное уменьшение эффективности будет только в том случае, если хотя бы у одного из агентов РРТС останется энергетический заряд для выполнения задачи, закрепленной за вредоносным агентом. В противном случае агенты РРТС должны вернуться на базу для заряда аккумулятора и последующего выполнения оставшейся задачи. Если же рассматривать задачи, для которых оперативность их выполнения является критически важным показателем (как в текущей задаче), то подобное задание можно считать невыполненным.

Необходимо отметить, что наблюдаются и такие ситуации, когда при наличии вредоносных агентов минимальное время выполнения задания РРТС было меньше по сравнению с симуляцией без вредоносного агента. Это объясняется тем, что позиции задач генерировались случайным образом и задачи, которые выбрали обычный и вредоносный агенты, оказались на малом расстоянии друг от друга.

При масштабировании численности агентов РРТС и увеличении количества вредоносных агентов до 25 % среднее время выполнения задания увеличивается на 17 % (127,12 с против 153,16 с), а при наличии 50 % вредоносных агентов – на 25,14 % (121,23 с против 161,95 с). Приведенные значения можно считать минимальной величиной ущерба в результате реализации атаки внедренного вредоносного агента. Рассмотренные значения взяты по минимальной границе, но являются достаточно наглядными. Расчет более точных значений показателей является достаточно трудной задачей без рассмотрения конкретной программно-аппаратной реализации робототехнических устройств, используемых в качестве агентов РРТС.

Таблица 2 – Показатели качества выполнения задания РРТС с различным количеством вредоносных агентов

Критерий	Время выполнения задания, с			
	10/0	10/1	10/3	10/5
Количество агентов n / вредоносных агентов \hat{z}	10/0	10/1	10/3	10/5
Максимальное значение	156,72	191,32	201,12	237,81
Среднее значение	121,23	134,34	146,14	161,95
Минимальное значение	99,73	101,17	102,61	110,07
Количество агентов n / вредоносных агентов \hat{z}	50/0	50/1	50/13	50/25
Максимальное значение	160,97	182,17	202,81	223,65
Среднее значение	127,12	140,45	153,16	176,15
Минимальное значение	112,62	109,94	107,79	123,79
Количество агентов n / вредоносных агентов \hat{z}	100/0	100/1	100/25	100/50
Максимальное значение	159,71	187,38	198,38	217,9
Среднее значение	129,08	140,67	164,46	177,32
Минимальное значение	113,43	115,65	118,28	144,57

Согласно результатам проведенного эксперимента, вредоносный агент начинает атаку на первом шаге функционирования РРТС, в результате чего снижается эффективность выполнения задания. Так, работы, рассмотренные в части 3, позволяют выявить вредоносного агента, однако в представленном эксперименте его выявление не имеет смысла, так как агент уже осуществил атаку и больше может не находиться в области видимости агентов РРТС. Впоследствии этот же агент может внедриться в другую РРТС и повторно осуществить вредоносное воздействие. Исходя из этого, решением подобной задачи является разработка методов и алгоритмов аутентификации и авторизации агентов РРТС, которые позволят учесть все особенности систем данного вида, а также минимизировать возможность влияния вредоносных агентов на первый шаг функционирования РРТС. Результаты проведенных литературного анализа и эксперимента наглядно демонстрируют противоречие в теории и практике проектирования и разработки систем управления РРТС, которое заключается в необходимости комплексного подхода к обеспечению безопасного функционирования РРТС с одной стороны, и недостаточном уровне развития научно-методического аппарата обеспечения ИБ РРТС с другой стороны, чем и определяется актуальность дальнейших исследований в данной области.

Заключение. В данной работе рассмотрен вопрос информационной безопасности РРТС в процессе масштабирования численности агентов при выполнении пространственно-распределенных задач. В ходе проведенных исследований были получены следующие основные результаты:

1. Формализована обобщенная модель функционирования РРТС. Выделен класс пространственно-распределенных задач, характеризующийся обязательным использованием процедуры распределения задач.
2. Сформированы обобщенные модели угроз и нарушителя информационной безопасности РРТС в процессе масштабирования численности агентов при выполнении пространственно-распределенных задач. Данные результаты могут быть полезны специалистам в области проектирования и разработки РРТС.
3. Проведен анализ исследований, направленных на обеспечение информационной безопасности МРС с точки зрения возможности их применения в РРТС. Выявлены работы, которые в перспективе могут быть использованы для комплексной защиты информации в РРТС.

4. Проведена количественная оценка воздействия внедренных вредоносных агентов на результат функционирования РРТС при реализации атаки. Обоснована необходимость разработки технологий аутентификации и авторизации агентов РРТС в процессе масштабирования их численности агентов для выполнения пространственно-распределенных задач.

Дальнейшие исследования будут направлены на реализацию методов и алгоритмов аутентификации и авторизации агентов РРТС в процессе масштабирования численности агентов при выполнении пространственно-распределенных задач, предназначенных для комплексного обеспечения информационной безопасности функционирования РРТС совместно с известными методами выявления и идентификации вредоносных агентов.

Библиографический список

1. Zakiev, A. Swarm Robotics: Remarks on Terminology and Classification / A. Zakiev, T. Tsoy, E. Magid // *Interactive Collaborative Robotics (ICR 2018)*. – 2018. – P. 291–300.
2. Каляев, И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
3. Петренко, В. И. Прогнозная оценка траектории руки оператора для решения обратной задачи динамики при копирующем управлении / В. И. Петренко, Ф. Б. Тебueva, М. М. Гурчинский, В. О. Антонов, А. С. Павлов // *Труды СПИИРАН*. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 123–147.
4. Павлов, А. С. Методика планирования траектории движения группы мобильных роботов в неизвестной замкнутой среде с препятствиями / А. С. Павлов // *Системы управления, связи и безопасности*. – 2021. – № 3. – С. 38–59.
5. Kovács, G. Resource management simulation using multi-agent approach and semantic constraints / G. Kovács, N. Yussupova, D. Rizvanov // *Pollack Period.* – 2017. – Vol. 12, № 1. – P. 45–58.
6. Пшихопов, В. Х. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев // *Труды СПИИРАН*. – 2018. – Т. 60, № 5. – С. 39–63.
7. Кривенко, М. П. Компьютерная модель возникновения коллективного поведения роботов / М. П. Кривенко, М. И. Анчечков // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2019. – № 6. – С. 21–26.
8. Alonso-Mora, J. Multi-robot formation control and object transport in dynamic environments via constrained optimization / J. Alonso-Mora, S. Baker, D. Rus // *The International Journal of Robotics Research*. – 2017. – Vol. 36, № 9. – P. 1000–1021.
9. Dai, W. Multi-robot dynamic task allocation for exploration and destruction / W. Dai, H. Lu, J. Xiao, Z. Zeng, Z. Zheng // *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. – 2020. – Vol. 98, № 2. – P. 455–479.
10. Dutta, A. Correlation Clustering Based Coalition Formation for Multi-Robot Task Allocation / A. Dutta, V. Ufimtsev, A. Asaithambi // *Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*. – 2019. – P. 906–913.
11. Tkach, I. A Modified Distributed Bees Algorithm for Multi-Sensor Task Allocation / I. Tkach, A. Jevtić, S. Y. Nof, Y. Edan // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18. – P. 759–775.
12. Saravanan, S. Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems / S. Saravanan, K. C. Ramanathan, M. M. Ramya, M. N. Janardhanan // *Industrial Robot*. – 2020. – Vol. 47, № 6. – P. 929–942.
13. Khamis, A. Multi-robot Task Allocation: A Review of the State-of-the-Art / A. Khamis, A. Hussein, A. Elmogy // *Cooperative Robots and Sensor Networks*. – 2015. – P. 31–51.
14. Dorigo, M. Swarm intelligence / M. Dorigo, M. Birattari // *Scholarpedia*. – 2007. – Vol. 9, № 2. – P. 1462.
15. Sujit, P. B. Cooperative forest fire monitoring using multiple UAVs / P. B. Sujit, D. Kingston, R. Beard // *46th IEEE Conference on Decision and Control, 10–11 December 2007, New Orleans, Louisiana, USA*. – 2007. – P. 4875–4880.
16. Чжай, М. Многоагентная робототехническая система спасения при землетрясениях : дис. ... канд. техн. наук / М. Чжай. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 2019.
17. Petrenko, V. Path Planning Method in the Formation of the Configuration of a Multifunctional Modular Robot Using a Swarm Control Strategy / V. Petrenko, F. Tebueva, A. Pavlov, V. Antonov, M. Kochanov // *Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019)*. – 2019. – P. 165–170.
18. Higgins, F. Threats to the swarm: Security considerations for swarm robotics / F. Higgins, A. Tomlinson, K. M. Martin // *International Journal on Advances in Security*. – 2009. – Vol. 2, № 2. – P. 288–297.
19. Зикратов, И. А. Анализ уязвимостей робототехнических комплексов с роевым интеллектом / И. А. Зикратов, Е. В. Козлова, Т. В. Зикратова // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2013. – Т. 5, № 87. – С. 149–154.
20. Зикратов, И. А. Доверительная модель информационной безопасности мультиагентных робототехнических систем с децентрализованным управлением / И. А. Зикратов, Т. В. Зикратова, И. С. Лебедев // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2014. – Т. 2, № 90. – P. 47–52.
21. Коваль, Е. Н. Общая модель безопасности робототехнических систем / Коваль Е. Н., Лебедев И. С. // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2013. – Т. 4, № 86. – С. 153–154.
22. Викснин, И. И. Модели и методы обнаружения нарушений целостности информации в группах беспилотных транспортных средств : дис. ... канд. техн. наук / И. И. Викснин. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2018.
23. Dorigo, M. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents / M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colomni // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B*. – 1996. – Vol. 26, № 1. – P. 29–41.
24. Poli, R. Particle swarm optimization / R. Poli, J. Kennedy, T. Blackwell // *Swarm Intelligence*. – 2007. – Vol. 1, № 1. – P. 33–57.
25. Pham, D. The Bees Algorithm Technical Note / D. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi // *Manufacturing Engineering Centre*. – Cardiff University, UK, 2005. – P. 1–57.
26. Зикратов, И. А. Модель безопасности мобильных мультиагентных робототехнических систем с коллективным управлением / И. А. Зикратов, И. И. Викснин, Т. В. Зикратова, А. А. Шлыков, Д. И. Медведков // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 439–449.
27. Зикратов, И. А. Совершенствование police office model для обеспечения безопасности роевых робототехнических систем / И. А. Зикратов, А. В. Гуртов, Т. В. Зикратова, Е. В. Козлова // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2014. – Т. 5, № 93. – С. 99–109.

28. Петренко, В. И. Анализ технологий обеспечения информационной безопасности мультиагентных робототехнических систем с роевым интеллектом / В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, М. М. Гурчинский, С. С. Рябцев // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – Т. 4, № 106. – С. 96–99.

29. Петренко, В. И. Метод достижения консенсуса для роя роботов относительно наиболее часто встречающейся особенности окружающей среды на основе технологии блокчейн / В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, С. С. Рябцев, И. В. Стручков // Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации : сборник докладов II Всероссийской научной конференции (с приглашением зарубежных ученых), Ставрополь, 30 ноября 2020 года. – Ставрополь, 2020. – С. 249–254.

30. Tebueva, F. A method of counteracting Byzantine robots with a random behavior strategy during collective design-making in swarm robotic systems / F. Tebueva, S. Ryabtsev, I. Struchkov // International scientific forum on computer and energy Sciences (WFCEs 2021). – 2021. – P. – 1–8.

31. Довгаль, В. А. Анализ уязвимостей и угроз безопасности роя дронов с поддержкой wi-fi, противостоящего атакам злоумышленников / В. А. Довгаль, Д. В. Довгаль // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2020. – Т. 3, № 266. – С. 67–73.

32. Басан, А. С. Анализ и разработка средств обеспечения безопасности для систем группового управления автономными мобильными роботами / А. С. Басан, Е. С. Басан, О. Б. Макаревич // Вопросы кибербезопасности. – 2017. – Т. 5, № 24. – С. 42–49.

33. Юрьева, Р. А. Метод и модель выявления и идентификации угроз нарушения информационной безопасности мультиагентных робототехнических систем : дис. ... канд. техн. наук / Р. А. Юрьева. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017.

34. Chen, L. Securing emergent behaviour in swarm robotics / L. Chen, S.-L. Ng // Journal of Information Security and Applications. – 2021. – Vol. 64. – P. 1–17.

35. Sargeant, I. Review of Potential Attacks on Robotic Swarms / I. Sargeant, A. Tomlinson // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2018. – P. 628–646.

36. Sandoval, S. Cyber Security Assessment of the Robot Operating System 2 for Aerial Networks / S. Sandoval, P. Thulasiraman // 2019 IEEE International Systems Conference (SysCon). – 2019. – P. 1–8.

37. Gazebo // Gazebo. – Режим доступа: <http://gazebo.org/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 17.02.2022).

38. ROS2 // Github. – Режим доступа: <https://github.com/ros2/ros2/wiki/DDS-and-ROS-middlewreimplementations/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 17.02.2022).

39. Madhu, A. Positioning Optimization of Drones using IMU and Securing UAV Communication by implementing Hybrid Cryptosystem / A. Madhu, M. B. Harshith, Prajeesha // 2021 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). – 2021. – P. 681–686.

40. Khanh, T. D. TRA: Effective Authentication Mechanism for Swarms of Unmanned Aerial Vehicles / T. D. Khanh, I. Komarov, L. D. Don, R. Iureva, S. Chuprov // 2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). – 2020. – P. 1852–1858.

41. Chen, A. ToAM: a task-oriented authentication model for UAVs based on blockchain / A. Chen, K. Peng, Z. Sha // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2021. – Vol. 2021, № 1. – P. 1–16.

42. Мариненков, Е. Д. Анализ защищенности информационного взаимодействия группы беспилотных летательных аппаратов / Е. Д. Мариненков, И. И. Вексин, Ю. А. Жукова, М. А. Усова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18, № 5. – С. 817–825.

43. Sánchez-Ibáñez, J. R. Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review / J. R. Sánchez-Ibáñez, C. J. Pérez-del-Pulgar, A. García-Cerezo // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 7898. – P. 1–29.

References

1. Zakiev, A., Tsoy, T., Magid, E. Swarm Robotics: Remarks on Terminology and Classification. *Interactive Collaborative Robotics (ICR 2018)*, 2018, pp. 291–300.
2. Kalyaev, I. A., Gaiduk, A. R., Kapustyan, S. G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov* [Models and Algorithms for Collective Control in Groups of Robots]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009.
3. Petrenko, V. I., Tebueva, F. B., Gurchinsky, M. M., Antonov, V. O., Pavlov, A. S. Prognoznaya otsenka traektorii ruki operatora dlya resheniya obratnoy zadachi dinamiki pri kopiruyushhem upravlenii [Predictive assessment of operator's hand trajectory with the copying type of control for solution of the inverse dynamic problem]. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2019, vol. 18, no. 1, pp. 123–147.
4. Pavlov, A. S. Metodika planirovaniya traektorii dvizheniya gruppy mobilnykh robotov v neizvestnoy zamknoy srede s prepyatstviyami [Methodology for Planning the Trajectory of a Group of Mobile Robots in Unknown Closed Environment with Obstacles]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2021, no. 3, pp. 38–59.
5. Kovács, G., Yussupova, N., Rizvanov, D. Resource management simulation using multi-agent approach and semantic constraints. *Pollack Period*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 45–48.
6. Pshikhopov, V. K., Medvedev, M. Yu. Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobilnykh robotov v neopredelennoy srede s ispolzovaniem neustoychivykh rezhimov [Group Control of Autonomous Robots Motion in Uncertain Environment via Unstable Modes]. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2018, vol. 60, no. 5, pp. 39–63.
7. Anchekov, M. I., Krivenko, M. P. Kompyuternaya model vozniknoveniya kollektivnogo povedeniya robotov [Computer model of the emergence of collective robot behavior]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2019, no. 6, pp. 21–26.
8. Alonso-Mora, J., Baker, S., Rus, D. Multi-robot formation control and object transport in dynamic environments via constrained optimization. *The International Journal of Robotics Research*, 2017, vol. 36, no. 9, pp. 1000–1021.
9. Dai, W., Lu, H., Xiao, J., Zeng, Z., Zheng, Z. Multi-robot dynamic task allocation for exploration and destruction. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, vol. 98, no. 2, pp. 455–479.
10. Dutta, A., Ufimtsev, V., Asaithambi, A. Correlation Clustering Based Coalition Formation For Multi-Robot Task Allocation. *Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, 2019, pp. 906–913.
11. Tkach, I., Jevtić, A., Nof, S. Y., Edan, Y. A Modified Distributed Bees Algorithm for Multi-Sensor Task Allocation.

Sensors, 2018, vol. 18, p. 759.

12. Saravanan, S., Ramanathan, K. C., Ramya, M. M., Janardhanan, M. N. Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems. *Industrial Robot*, 2020, vol. 47, no. 6, pp. 929–942.

13. Khamis, A., Hussein, A., Elmogy, A. Multi-robot Task Allocation: A Review of the State-of-the-Art. *Cooperative Robots and Sensor Networks*, 2015, pp. 31–51.

14. Dorigo, M., Birattari, M. Swarm intelligence. *Scholarpedia*, 2007, vol. 9, no. 2, p. 1462.

15. Sujit, P. B., Kingston, D., Beard, R. Cooperative forest fire monitoring using multiple UAVs. *46th IEEE Conference on Decision and Control, 10–11 December 2007, New Orleans, Louisiana USA*, 2007, pp. 4875–4880.

16. Chzhaj, M. Mnogoagentnaya robototekhnicheskaya sistema spaseniya pri zemletryaseniya [Multi-agent robotic earthquake rescue system]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2019. 158 p.

17. Petrenko, V., Tebueva, F., Pavlov, A., Antonov, V., Kochanov, M. Path Planning Method in the Formation of the Configuration of a Multifunctional Modular Robot Using a Swarm Control Strategy. *Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019)*, 2019, pp. 165–170.

18. Higgins, F., Tomlinson, A., Martin, K. M. Threats to the swarm: Security considerations for swarm robotics. *International Journal on Advances in Security*, 2009, vol. 2, no. 2, pp. 288–297.

19. Zikratov, I. A., Kozlova, E. V., Zikratov, T. B. Analiz uyazvimostey robototekhnicheskikh kompleksov s roevym intellektom [Analysis of vulnerabilities of robotic systems with swarm intelligence]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2013, vol. 5, no. 87, pp. 149–154.

20. Zikratov, I. A., Zikratov, T. B., Lebedev, I. S. Dovernitel'naya model informatsionnoy bezopasnosti multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem s detsentralizovannym upravleniem [Trust model for information security of multi-agent robotic systems with a decentralized management]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2014, vol. 2, no. 90, pp. 47–52.

21. Koval, E. N., Lebedev, I. S. Obshchaya model bezopasnosti robototekhnicheskikh sistem [General safety model for robotic systems]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2013, vol. 4, no. 86, pp. 153–154.

22. Viksnin, I. I. *Modeli i metody obnaruzheniya narusheniy tselostnosti informatsii v gruppakh bespilotnykh transportnykh sredstv* [Models and methods for detecting information integrity violations in groups of unmanned vehicles]. St. Petersburg, ITMO University, 2018. 207 p.

23. Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B*, 1996, vol. 26, no. 1, pp. 29–41.

24. Poli, R., Kennedy, J., Blackwell, T. Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence*, 2007, vol. 1, no. 1, pp. 33–57.

25. Pham, D., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., Rahim, S., Zaidi, M. The Bees Algorithm Technical Note. *Manufacturing Engineering Centre*. Cardiff University, UK, 2005, pp. 1–57.

26. Zikratov, I. A., Viksnin, I. I., Zikratov, T. B., Shlykova, A. A., Medvedkov, D. I. Model bezopasnosti mobilnykh multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem s kollektivnym upravleniem [Security model of mobile multi-agent robotic systems with collective management]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2017, no. 3, pp. 439–449.

27. Zikratov, I. A., Gurtov, A. V., Zikratova, T. V., Kozlova, E. V. Sovershenstvovanie police office model dlya obespecheniya bezopasnosti roevykh robototekhnicheskikh sistem [Improving the police office model to ensure the safety of swarm robotic systems]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2014, vol. 5, no. 93, pp. 99–109.

28. Petrenko, V. I., Tebueva, F. B., Gurchinsky, M. M., Ryabtsev, S. S. Analiz tekhnologiy obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem s roevym intellektom [Analysis of information security technologies for multi-agent robotic systems with swarm intelligence]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: Development Ways], 2020, vol. 4, no. 106, pp. 96–99.

29. Petrenko, V. I., Tebueva, F. B., Ryabtsev, S. S., Struchkov, I. V. Metod dostizheniya konsensusa dlya roya robotov otноситelno naibolee chasto vstrechayushcheyosya osobennosti okruzhayushhey sredy na osnove tekhnologii blokcheyn [A method for achieving consensus for a swarm of robots on the most frequently occurring feature of the environment based on blockchain technology]. *Fundamentalnye problemy informatsionnoy bezopasnosti v usloviyakh tsifrovoy transformatsii: sbornik dokladov II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (s priglazheniem zarubezhnykh uchennykh)* [Fundamental problems of information security in the context of digital transformation: proceedings of the II All-Russian Scientific Conference (with the invitation of foreign scientists)], Stavropol, 2020, pp. 249–254.

30. Tebueva, F., Ryabtsev, S., Struchkov, I. A method of counteracting Byzantine robots with a random behavior strategy during collective design-making in swarm robotic systems. *International scientific forum on computer and energy Sciences (WFCES 2021)*, 2021, pp. 1–8.

31. Dovgal, V. A., Dovgal, D. V. Analiz uyazvimostey i ugroz bezopasnosti roya dronov s podderzhkoy wi-fi, protivostoyashchego atakam zloumyshlennikov [Analysis of vulnerabilities and security threats of a swarm of wi-fi-enabled drones that resist attacks by intruders]. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskije nauki* [Proceedings of Adygea State University. Series 4: Natural-mathematical and technical sciences], 2020, vol. 3, no. 266, pp. 67–73.

32. Basan, A. S., Basan, E. S., Makarevich, O. B. Analiz i razrabotka sredstv obespecheniya bezopasnosti dlya sistem gruppovogo upravleniya avtonomnymi mobilnymi robotami [Analysis of ways to secure group control for autonomous mobile robots]. *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cyber security issues], 2017, vol. 5, no. 24, pp. 42–49.

33. Urieva, R. A. *Metod i model vyavleniya i identifikatsii ugroz narusheniya informatsionnoy bezopasnosti multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem* [Method and model for detecting and identifying threats to information security violations of multi-agent robotic systems]. St. Petersburg, ITMO University, 2017. 132 p.

34. Chen, L., Ng, S.-L. Securing emergent behaviour in swarm robotics. *Journal of Information Security and Applications*, 2021, vol. 64, pp. 1–17.

35. Sargeant, I., Tomlinson, A. Review of Potential Attacks on Robotic Swarms. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2018, pp. 628–646.

36. Sandoval, S., Thulasiraman, P. Cyber Security Assessment of the Robot Operating System 2 for Aerial Networks.

2019 *IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 2019, pp. 1–8.

37. Gazebo. Available at: <http://gazebo.org/> (accessed 17.02.2022).

38. ROS2. Available at: <https://github.com/ros2/ros2/wiki/DDS-and-ROS-middlewareimplementations/> (accessed 17.02.2022).

39. Madhu, A., Harshith, M. B., Prajeesha. Positioning Optimization of Drones using IMU and Securing UAV Communication by implementing Hybrid Cryptosystem. *5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 2021, pp. 681–686.

40. Khanh, T. D., Komarov, I., Don, L. D., Iureva, R., Chuprov, S. TRA: Effective Authentication Mechanism for Swarms of Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2020, pp. 1852–1858

41. Chen, A., Peng, K., Sha, Z. ToAM: a task-oriented authentication model for UAVs based on blockchain. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, vol. 2021, no. 1, pp. 1–16.

42. Marinenkov, E. D., Viksnin, I. I., Zhukova, Yu. A., Usova, M. A. Analiz zashchishhennosti informatsionnogo vzaimodeystviya gruppy bespilotnykh letatelnykh apparatov [Security analysis of information interaction of a group of unmanned aerial vehicles]. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2018, vol. 18, no. 5, pp. 817–825.

43. Sánchez-Ibáñez, J. R., Pérez-del-Pulgar, C. J., García-Cerezo, A. Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 7898, pp. 1–29.

УДК 004.056

ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДИСЦИПЛИНЫ

Статья поступила в редакцию 01.05.2022, в окончательном варианте – 10.05.2022.

Попов Алексей Михайлович, Сибирский государственный университет науки и технологий имени М.Ф. Решетнева, 660037, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института информатики и телекоммуникаций, ORCID: 0000-0002-6011-9375, e-mail: vm_popov@sibsau.ru

Золотарев Вячеслав Владимирович, Сибирский государственный университет науки и технологий имени М.Ф. Решетнева, 660037, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31,

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности информационных технологий, ORCID: 0000-0002-8054-8564, e-mail: zolotarev@sibsau.ru

Кунц Екатерина Юрьевна, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 630102, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, начальник отдела дистанционного обучения, ORCID: 0000-0003-3903-4737, e-mail: kuntsey@sibguti.ru

При формировании образовательного содержания дисциплин наблюдается проблема управления информационной безопасностью больших объемов накапливаемых данных. Особенно это характерно для дисциплин, предполагающих использование данных цифрового следа, виртуализации, конфигурационных файлов как средств подготовки среды развертывания образовательного контента. В случае обучения информационной безопасности такой оперативной информацией является цифровой след, формируемый на уровне лабораторных работ. В работе показаны некоторые схемы управления информационной безопасностью при использовании цифрового следа и виртуальных лабораторий на уровне формирования цифрового двойника дисциплины. Использование предлагаемых схем может быть полезно для создания индивидуальных образовательных траекторий обучающихся на основе оперативных данных, образовательного контента виртуальных лабораторий, накопления и использования опыта обучения.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровой след, индивидуальная траектория, рабочая программа, сбор цифрового следа, образовательный процесс, информационная инфраструктура, информационно-образовательная среда, виртуальная лаборатория

INFORMATION SECURITY MANAGEMENT PROBLEM FOR CREATING A DISCIPLINE DIGITAL TWIN

The article was received by the editorial board on 01.05.2022, in the final version – 10.05.2022.

Popov Alexey M., Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation,

Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Institute of Informatics and Telecommunications, ORCID: 0000-0002-6011-9375, e-mail: vm_popov@sibsau.ru

Zolotarev Vyacheslav V., Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Information Technologies Security Department, ORCID: 0000-0002-8054-8564, e-mail: zolotarev@sibsau.ru

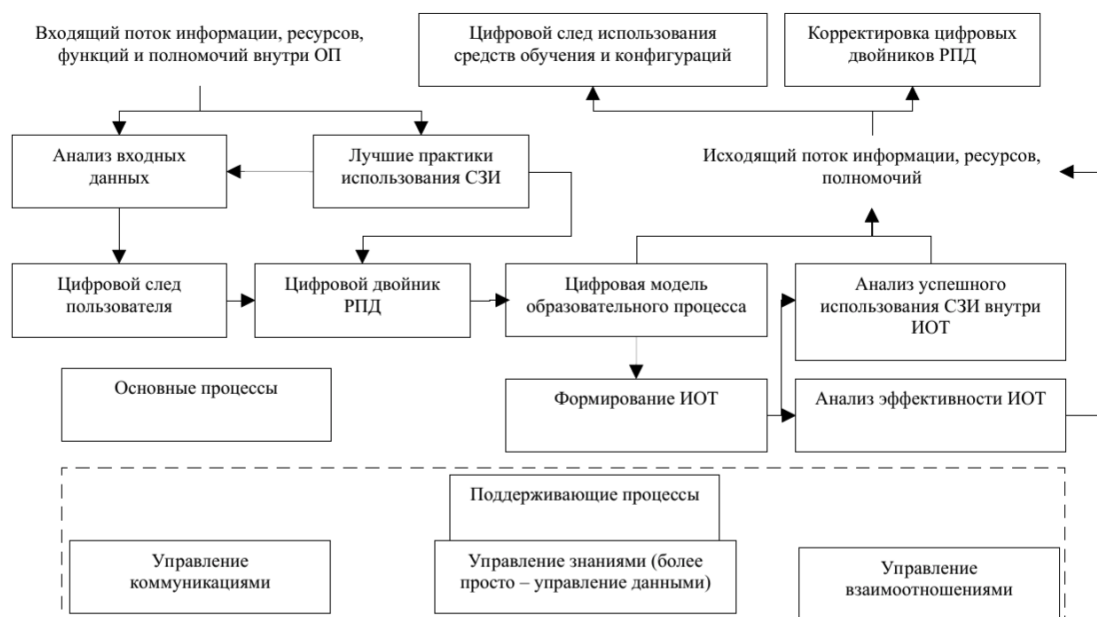
Kunts Ekaterina Yu., Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 86 Kirov St., Novosibirsk, 630102, Russian Federation,

Head of Distance Learning Department, ORCID: 0000-0003-3903-4737, e-mail: kuntsey@sibguti.ru

When forming the educational content of disciplines, there is a problem of information security management of large volumes of accumulated data. This is especially true for disciplines involving the use of digital footprint data, virtualization, and configuration files as means of preparing an educational content deployment environment. In the case of information security training, such operational information is a digital footprint formed at the level of laboratory work. The paper shows some information security management schemes when using a digital footprint and virtual laboratories at the level of forming a digital twin of the discipline. The use of the proposed schemes can be useful for creating individual educational trajectories of students based on operational data, educational content of virtual laboratories, accumulation, and use of learning experience.

Keywords: digital double, digital footprint, individual trajectory, work program, digital footprint collection, educational process, information infrastructure, information and educational environment, virtual laboratory

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Цифровые двойники представляют собой технологию, создаваемую с целью упростить и усовершенствовать работу физических прототипов объектов, целых систем и отдельных процессов. К примеру, цифровой двойник РПД (ЦД РПД) – это виртуальный прототип РПД в электронно-информационно-образовательной среде (ЭИОС) вуза. Целью разработки цифрового двойника дисциплины, в свою очередь, является возможность проактивного создания качественного образовательного контента, соответствующего требованиям рынка труда и регуляторов, а также цифровизации процесса формирования необходимой документации. Цифровые двойники дисциплины могут содержать как конфигурационные файлы применяемых лабораторных средств и их виртуальные копии, так и полноценные виртуальные лаборатории, реализующие определенные задачи внутри дисциплины. При этом перемещение цифрового двойника в рамках физического пространства лабораторий при наличии современной компьютерной техники существенно упрощено, так как среда развертывания и конфигурация могут быть подготовлены заранее, а наличие вписанного в требования университета цифрового двойника рабочей программы дисциплины позволяет автоматически (или в автоматизированном режиме) готовить документацию по объекту развертывания.

Цифровой след же представляет цифровые свидетельства достижения определенных результатов в ходе выполнения учебных задач. Работая с цифровым следом, возможно оперативно генерировать рекомендации к созданию образовательного контента, обогащая базы данных, необходимые для управления образовательным процессом, в том числе процессов управления информационной безопасностью в рамках такого управления.

Целью исследования, результаты которого приведены ниже, является улучшение интеграции реального образовательного процесса и его цифровых двойников через обогащение баз данных цифрового двойника, с учетом задач защиты информации, возникающих в процессе создания, обработки и интеграции. Проблема управления информационной безопасностью возникает на уровне поддерживающих (обеспечивающих) процессов и решается путем добавления указанных процессов в образовательную среду. В качестве инструментария используются:

- алгоритм сбора и анализа цифрового следа;
- технологии виртуализации;
- технологии работы с накапливаемыми данными как с едиными репозиториями.

Новыми результатами исследования, представленными ниже, стали изучение интеграционных процессов для цифровых двойников в образовании, формирование новых устойчивых связей поддерживающих процессов управления информационной безопасностью на уровне дисциплины или ее компонентов и цифрового двойника рабочей программы дисциплины, дисциплины, лабораторного оборудования, а также возможности комплексного использования возможностей применяемых технических средств в лабораторных работах и сборе цифрового следа.

Процесс управления образовательным процессом в обучении информационной безопасности.

Рассматривая процесс управления образовательным процессом даже на уровне обучения информационной безопасности на специализированных направлениях (такие как 10.03.01, 10.05.02 и пр.), стоит уделить внимание проектированию образовательных программ (ОП) и факторам, под влиянием которых разрабатывается образовательная программа по данному направлению (требования образовательных и профессиональных стандартов, профессионального сообщества ИБ, потребностей физического лица или организации, по инициативе которых осуществляется дополнительное образование, ожиданий работодателя, возможностей образовательной организации).

Содержание ОП, а в частности содержательная часть РПД, должны учитывать требования профессиональных стандартов по соответствующим должностям. Неотъемлемой частью структуры ОП является описание перечня профессиональных компетенций в рамках имеющейся квалификации; конкретное описание планируемых результатов, которые формируются в компетентностной форме для всех видов ОП. В соответствии с нормативными документами, образовательная программа разрабатывается на основании установленных профессиональных стандартов в области информационной безопасности (ИБ) и требований соответствующих федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС) в области ИБ (рис. 1).

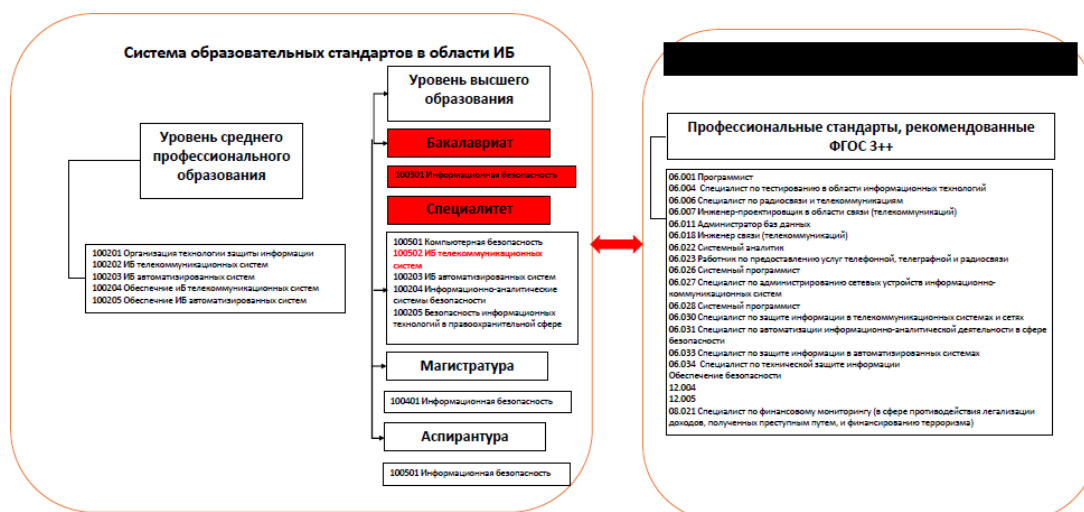


Рисунок 1 – Взаимосвязь ФГОС и профессиональных стандартов в области ИБ при проектировании образовательных программ

Однако в целом подход к разработке образовательных программ и дисциплин в области информационной безопасности гораздо шире, для формирования и описания профессиональных компетенций необходимо учитывать не только требования ФГОС и профессиональных стандартов, а также рекомендаций и стандартов профессионального сообщества, требования рынка труда. Анализ включает опрос работодателей, опрос образовательных организаций, реализующих программы в области ИБ, а также мониторинг сайтов-агрегаторов вакансий (рис. 2).

На данном этапе система подготовки специалистов в области информационной безопасности в Российской Федерации формируется и регламентируется нормативно-правовой документацией в сфере образования, в том числе путем разработки, обсуждения и принятия федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО), а также различными организациями [1].

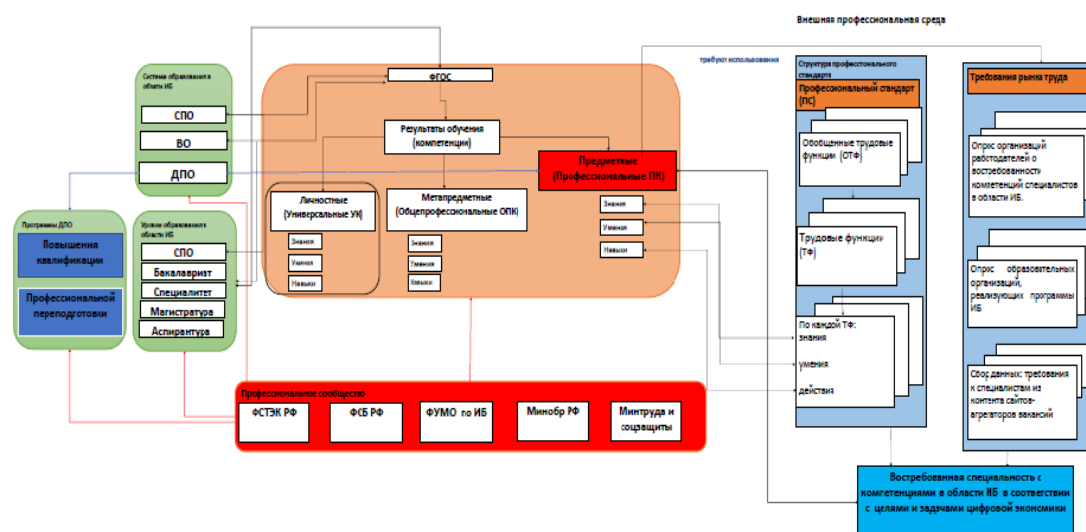


Рисунок 2 – Схема формирования профессиональной компетенции для программ ДПО в области ИБ

Процесс управления информационной безопасностью образовательного процесса. Таким образом, логично принять, что процесс управления образовательным процессом по направлению ИБ является серьезной задачей, требующей подробного анализа. К примеру, далее представлены некоторые варианты формирования цифрового следа, которые могут быть полезны для сбора оперативных данных для обогащения баз данных цифрового двойника дисциплины, схемы поддерживающих процессов, анализ формирования части цифрового двойника дисциплины на конкретных примерах.

Кроме всего указанного, здесь же необходимо учитывать и управление информационной безопасностью как часть указанного процесса. В основе своей это является следствием продолжающейся цифровой трансформации образовательного процесса. Управление информационной безопасностью в целом должно генерировать базовые процессы, применимые в задаче, такие как:

- управление требованиями к безопасности хранения, обработки, синтеза и анализа данных образовательного контента и цифрового следа;
- реализация процедур и сценариев обеспечения непрерывности образовательного контента, включая сценарии нарушения работоспособности при развертывании виртуальных стендов и контроля целостности цифровых двойников рабочих программ дисциплин;
- обучающие сценарии и сценарии оповещения при администрировании организационной и технической части образовательного процесса, в том числе и обучение действиям на основе стресс-тестов;
- управление уязвимостями используемого программного обеспечения для виртуальных лабораторий и виртуальной инфраструктуры в целом;
- управление рисками, включая правовые и юридические моменты, при формировании и использовании цифровых двойников дисциплин, рабочих программ, лабораторий и программных (программно-аппаратных) средств защиты информации (в рамках рассматриваемой проблематики; для иных областей образования – программных (программно-аппаратных) средств, используемых для формирования образовательного контента цифрового двойника дисциплины);
- управление инцидентами;
- целостное и непрерывное управление изменениями образовательного контента и цифровых двойников, включая процедуры синхронизации.

Далее будет показан план развертывания поддерживающих процессов для конкретных примеров – сбора цифрового следа, формирования виртуальной лаборатории.

Кроме того, необходимо отметить, что с точки зрения технологии управления информационной безопасностью не является критичным способ формирования цифрового двойника. К примеру, использование игровых сред на основе игровых технологий, в том числе с использованием элементов деловых игр и тренингов [2, 3], позволяет за счет высокого уровня вовлеченности обучающихся в процесс получать от них помощь в формировании указанных выше цифровых свидетельств. Использование же игровых вариантов типа Capture the Flag [4] генерирует хороший набор цифровых свидетельств автоматически, без привлечения участников. С точки зрения цифровых двойников рабочих программ также интересен опыт подготовки сотрудников организаций реального сектора, основанный на существующих программах security awareness [5], тренингов и обучения кибербезопасности в целом [6].

Далее показаны некоторые возможности работы с цифровым следом, формирования виртуальной лаборатории, порядок обогащения баз данных цифрового двойника и общая схема поддерживающих процессов, интегрированная в примеры развертывания.

Цифровой след и формирование цифрового двойника дисциплины. В рамках различных дисциплин образовательных программ в области информационной безопасности на стандартной основе предусмотрены лабораторные практикумы, основанные на фиксирующих цифровые свидетельства программных средствах. Цифровое свидетельство как способ документирования определенных действий в области защиты информации может быть легко использовано как компонент цифрового следа. К таким средствам формирования цифровых свидетельств как цифровых следов могут быть отнесены средства контроля утечек информации (DLP), средства анализа уязвимостей, системы анализа и управления информационными рисками, средства криптографической защиты информации (СКЗИ), средства криминалистического анализа. В обычном режиме не предполагается использование цифровых свидетельств, собранных на лабораторном практикуме, за рамками дисциплины; но в качестве первого шага обогащения баз цифрового двойника РПД это было бы полезным.

Второй шаг – это дообучение на основе использования цифрового следа. Внутри дисциплины создаются (корректируются) новые возможности, которые позволяют более полно использовать возможности лабораторных практикумов. Пока при этом не обновляются связи дисциплин, но возможны варианты корректировки лекционной или расчетной части дисциплины.

Основными процессами управления информационной безопасностью в данном случае должны быть:

- управление требованиями к безопасности хранения, обработки, синтеза и анализа данных образовательного контента и цифрового следа, основанное на непрерывном мониторинге цифровой среды, в которой развернут образовательный контент. При этом цифровая среда должна предполагать открытую (для внешнего мониторинга) и закрытую (для внутреннего использования) часть с соответствующим разграничением доступа;

- реализация процедур и сценариев обеспечения непрерывности образовательного контента, включая сценарии нарушения работоспособности при развертывании виртуальных стендов и контроля целостности цифровых двойников рабочих программ дисциплин. Этот процесс целесообразно координировать с процедурами разработки безопасного программного обеспечения, управления безопасностью развертывания виртуальных инфраструктур, управления нагрузкой и пр.;

- обучающие сценарии для формируемого набора действий при работе с цифровым следом.

Для поддерживающих процессов (рис. 3) в данном случае необходимо реализовать:

- управление записями и документацией дисциплины (разделов дисциплины);
- управление ресурсами в плане выделения процессорного времени, резервирования каналов передачи данных и оперативной памяти, резервирования времени использования инфраструктуры общего пользования;

- управление коммуникациями в плане формирования протоколов обмена данными цифрового следа, включая их безопасность.

На схеме ниже показан порядок использования таких данных для обогащения баз цифрового двойника дисциплины, включая поддерживающие процессы управления информационной безопасностью (рис. 3).

Образовательные ресурсы, используемые в данном случае, – любые вспомогательные источники информации, полезной для образовательного процесса, от форумов и баз данных до внешних источников, таких как агрегированные базы сетевых проектов или данные массовых онлайн-курсов. Как видно в примере, сбор цифрового следа может быть не только описан, но и алгоритмизирован на техническом уровне, приемлемом для реализации в образовательной системе, что через обучение может позволить постоянно повышать эффективность дообучения. При этом широкое использование именно цифровых свидетельств как компонентов цифрового следа является полезным, поскольку оставляет возможности для доказательства достижения определенного уровня и для ретроспективного анализа индивидуальной образовательной траектории.

Также возможно и целесообразно использование цифрового следа для формирования индивидуальной образовательной траектории (ИОТ) обучающегося. В области информационной безопасности существуют ограничения, формируемые в рамках консервативных пожеланий регулирующих органов, но при этом возможности работы с индивидуальной траекторией не закрыты – существуют возможности использования блока дисциплин по выбору или факультативных дисциплин, дисциплин дополнительного обучения и блоков (модулей), представленных партнерами образовательного учреждения.



Рисунок 3 – Цифровой след для обогащения баз данных цифрового двойника дисциплины

Для реализации технической части управления информационной безопасностью необходимо рассмотреть отдельно вопрос обеспечения защиты информации при работе с цифровым следом. Целесообразной для организации минимально допустимого уровня защищенности будет следующая последовательность действий:

1. Оценка снимаемых параметров, их формата и способа считывания для анализа возможности применения защитных мер. Цифровой след, собираемый для обогащения баз данных цифрового двойника, должен применяться достаточно широко и в различных задачах, поэтому анализ должен быть проведен комплексно, для всей информационной инфраструктуры.

2. Анализ протоколов обмена данными для получения информации о способе передачи, формате данных и заголовков, служебной информации, промежуточных коммуникационных устройствах. Если данные передаются между потребителями, необходимо обеспечить их недоступность третьим лицам, к примеру, за счет реализации виртуальной частной сети.

3. Анализ системы управления хранением данных и их обработкой. В большинстве случаев речь будет идти либо о работе с файлами, в том числе большого размера, либо о системе управления базами данных. Соответственно меры по защите информации будут сосредоточены либо на безопасности штатных средств обработки данных, либо на защите учетных записей, привязанных к их обработке. Также допустимо сквозное шифрование. Для цифрового следа значимыми процессами также будут подтверждение авторства и неотказуемость от операций, реализуемых с применением электронной подписи.

4. Анализ порядка доступа к данным. Варианты доступа к данным, с одной стороны, должны учитывать необходимость их использования, а с другой – возможность сохранения их целостности, конфиденциальности и доступности. Работая с порядком доступа к данным, необходимо обеспечить и быстрое восстановление, в том числе резервное копирование.

На уровне реализации цифрового двойника должны быть предусмотрены и возможности интеграции в программу электронного обучения различного типа [7]. Результатом такой интеграции может и должна стать единая система формирования ИОТ внутри дисциплин, в том числе защищенной среды работы с данными цифрового следа, используемой для поддержки формирования ИОТ.

Процессы управления информационной безопасностью здесь должны быть представлены как основными, так и поддерживающими компонентами. К основным должны быть отнесены:

- управление требованиями к безопасности хранения, обработки, синтеза и анализа данных образовательного контента и цифрового следа – в части сохранения персональных данных и данных ИОТ для задач формирования и поддержки образовательной траектории. Здесь существенное значение может иметь даже не конфиденциальность, а целостность и сохранность данных;

- реализация процедур и сценариев обеспечения непрерывности образовательного контента, включая сценарии нарушения целостности данных, собранных при прохождении индивидуальной траектории, в том числе и для цифровых следов различных типов;
- управление уязвимостями используемого программного обеспечения для управления индивидуальной образовательной траекторией, в том числе собственной разработки;
- управление рисками, включая риск нарушения аккредитационных требований;
- управление инцидентами, связанными с невыполнением требований защиты контента, данных обучающихся и пр.;
- целостное и непрерывное управление изменениями образовательного контента и цифровых двойников, включая процедуры синхронизации.

Поддерживающие процессы, в свою очередь, сосредоточены в этом случае на управлении коммуникациями, в особых случаях добавляется управление знаниями, а также на управлении безопасностью взаимоотношений с заинтересованными сторонами.

Возникает положительная обратная связь между сбором цифровых свидетельств, в том числе различных записей, и формированием образовательной траектории. Центральное место при этом занимает цифровой двойник дисциплины – РПД и соответствующие базы записей, используемые образовательным учреждением. Наборы цифровых двойников дисциплин формируют с учетом взаимных связей цифровую модель образовательного процесса, на основе которой и будут сформированы образовательные траектории.

Пример формирования части цифрового двойника – формирование виртуальной образовательной лаборатории. Здесь актуальными будут поддерживающие процессы управления данными, управления безопасностью взаимоотношений с заинтересованными сторонами. Основные процессы показаны на схеме ниже (рис. 4).

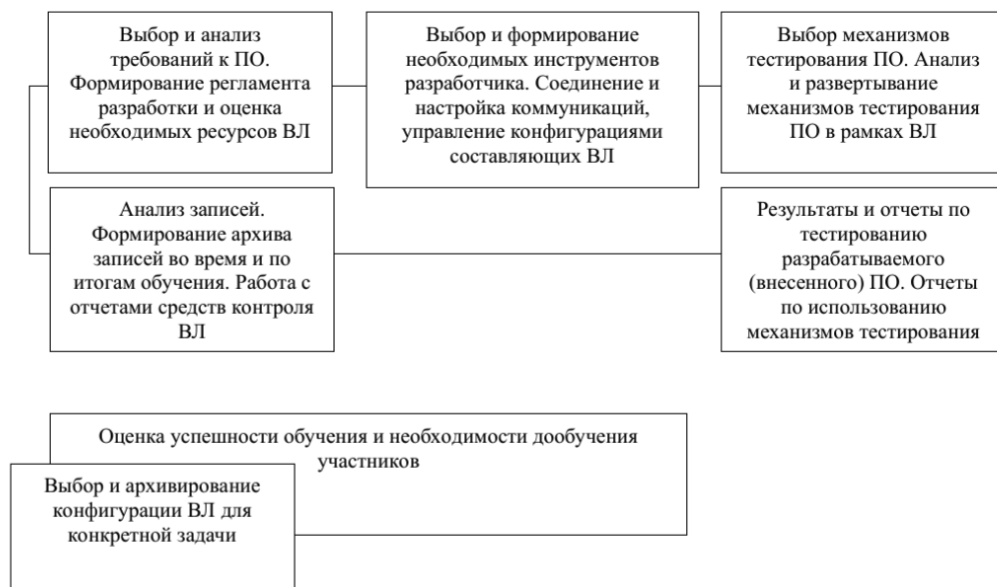


Рисунок 4 – Формирование виртуальной лаборатории, включая поддерживающие процессы управления ИБ

Технически в рамках предложенной концепции [8] формирование РПД инициируется из «1С: Университет ПРОФ» ответственными лицами, формируется структура документа с данными из учебного плана, содержащая объем нагрузки, виды занятий, предусмотренные в учебном плане, компетенции, аудиторный фонд, материально-техническое обеспечение. Данная структура после инициации формирования загружается в систему управления обучением (LMS), где с ней начинает работать научно-педагогический работник. Имея доступ к базам цифровых следов, система может автоматически назначать или корректировать составляющие дисциплин, что позволяет оперативно управлять индивидуальной образовательной траекторией каждого обучающегося. Дополнение образовательного процесса новыми модулями может быть реализовано не только за счет изменения РПД, но и в рамках работы с цифровым двойником с применением инструментов интеграции дополнительных обучающих практик, таких как квизы [9] и различного типа кейсовые задания [10]. Формально эти практики могут иметь статус внеучебной деятельности, но, так как на уровне цифрового двойника эта работа предусмотрена как дополнительная развивающая, ее результаты могут быть учтены для корректного формирования ИТ как в рамках обучения в целом, так и в рамках отдельных дисциплин. При этом возможно формировать специальные цифровые двойники для отдельных задач, в том числе цифровые двойники обучающихся [11].

При формировании образовательной траектории критичным является актуализация баз цифровых двойников дисциплины и РПД. При формировании баз данных возможно использовать различные источники (рис. 5).



Рисунок 5 – Обогащение баз данных цифрового двойника

Как видно из схемы, можно работать с различными источниками данных, но для их обобщения требуется работа по формализации записей. На настоящий момент это представляется большой сложностью и фактически не решено ни в одной образовательной программе в области информационной безопасности.

Рассмотрим конкретный пример. Если принять, что главной целью формирования цифрового двойника является управление реализацией (в том числе с учетом упомянутых выше требований управления информационной безопасностью) дисциплины (см. выше), то интересны возможности использования алгоритма обогащения на конкретных примерах. В данном случае рассмотрено обучение по учебному плану набора 2021 г. в Сибирском государственном университете науки и технологий (Красноярск) по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», специализация «Разработка защищенных телекоммуникационных систем». Пример использования алгоритма показан в таблице 1 ниже. Формат, как видно из примера, учитывает работу поддерживающих процессов управления ИБ в части работы с данными и пользователями, оповещения и управления непрерывностью.

Таблица 1 – Пример использования алгоритма

Семестр	Назначение	СЗИ	Формат	Дисциплина
3	Сбор цифрового следа при формировании ЭП обучающегося – общие требования, формирование подписи и документации на нее, сертификата	УЦ КриптоПро	БД цифровых сертификатов обучающихся	Основы информационной безопасности
4	Сбор цифрового следа в автоматическом режиме при использовании DLP – общие вопросы, настройка, обнаружение фиксированных записей	Infowatch/ Staffcop	Общий архив отчетов на сервере. Архивы подписаны персональной ЭП	Гуманитарные аспекты информационной безопасности
5	Сбор цифрового следа при настройке сетевого подключения сервер-клиент на примере сетевых СЗИ с агентами-сборщиками данных	Staffcop	Конфигурационные файлы пользователей. Подписаны персональной ЭП	Вычислительные сети передачи данных открытых информационных систем
6	Сбор цифрового следа при использовании аутентификационных параметров и протоколов аутентификации	КриптоПро, Infowatch	Дампы трафика учебных задач, аналитика по трафику. Подписаны персональной ЭП	Безопасность вычислительных сетей
7	Сбор цифрового следа по результатам решения кейсов по применению DLP в задачах обнаружения инсайдера во внутренней инфраструктуре организации	Infowatch/ Staffcop, УЦ КриптоПро	Решения кейсов по применению DLP. Подписаны персональной ЭП. Аналитика учебных чатов обучающихся. Аналитика социальных графов при решении задачи	Управление информационной безопасностью

Как видно из таблицы, последовательность действий обучающегося может содержать вариативность как внутри одной дисциплины, так и внутри набора дисциплин в зависимости от формируемой компетенции.

Пример работы алгоритма для одной дисциплины показан в таблице 2.

Таблица 2 – Пример ИОТ внутри одной дисциплины (СибГУ им. М.Ф. Решетнева, специальность 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», набор 2020 г., дисциплина «Средства криптографической защиты информации»)

Модуль	Действие	СЗИ	Модуль	Лабораторная работа
Компетенция ПК-6		Способность применять технологии обеспечения информационной безопасности телекоммуникационных систем и нормы их интеграции в государственную и международную информационную среду		
1	Сбор цифрового следа при развертывании СКЗИ – журнал развертывания, отчеты, протоколы защиты лабораторных работ	КриптоПро CSP	Назначение шифровальных средств	Развертывание КриптоПро CSP
2	Сбор цифрового следа в автоматическом режиме при работе с УЦ КриптоПро (альтернатива)	УЦ КриптоПро	Симметричное и асимметричное шифрование	Развёртывание сервера центр сертификации ПАК «КриптоПро УЦ 2.0»
2	Сбор цифрового следа при настройке сетевого подключения СКЗИ «Континент» (альтернатива, дополнительная работа)	Криптошлюз «Континент» (вирт.)	Симметричное и асимметричное шифрование	Развёртывание VPN
3	Выполнение дополнительных заданий (сертификация) по направлению «Инфраструктура открытых ключей»		Дополнительный	Работа по треку партнера образовательной организации
3	Выполнение дополнительных заданий (сертификация) по направлению «СКЗИ Континент»		Дополнительный	Работа по треку партнера образовательной организации

При этом у него также сохраняется набор показателей цифрового следа, который свидетельствует о развитии soft skills. Таким образом, кроме реализации задач управления ИБ, в образовательных целях можно считать полезным применение методики как для наддисциплинарных треков в индивидуальной образовательной траектории, так и для внутривнутридисциплинарных корректировок.

Заключение. Показанный подход применим к различным программам в области информационной безопасности. При этом необходимо соблюдение нескольких условий, которые открывают возможности подхода и не противоречат требованиям ФГОС и регуляторов.

Это использование общих баз данных и сохранение записей, корректные формальные структуры записей и способы автоматического исследования записей и результатов опросов данных.

Управление информационной безопасностью в данном случае решает задачу поддержки основных процессов для гарантированного соблюдения определенных требований. Показанные варианты интеграции основных и поддерживающих процессов управления информационной безопасностью могут быть реализованы как универсальные, но для технических дисциплин с возможностью виртуализации лабораторных работ предлагаемый подход наиболее интересен.

Предлагаемый подход может быть сложным в реализации в традиционной программе, без использования соответствующих инструментов, таких как цифровые двойники РПД и цифровая модель образовательного процесса. При этом в рамках последних программ поддержки университетов – «Приоритет-2030», цифровая трансформация – предполагается поддержка внедрения именно таких инструментов, и учет требований информационной безопасности для них является крайне актуальным и важным как с технической стороны, так и со стороны политик безопасности и общих концепций (процессных моделей) управления информационной безопасностью.

Библиографический список

1. Анурьева, М. С. Современная система образования в области информационной безопасности в Российской Федерации / М. С. Анурьева // Вестник ТГУ. – 2018. – № 3 (173).
2. Tang, S., Hanneghan, M. A Model-Driven Framework to Support Development of Serious Games for Game based Learning / S. Tang, M. Hanneghan // The 3rd International Conference on Developments in e-Systems Engineering. – London, UK, 2010. – DOI: 10.1109/DeSE.2010.23.
3. Jin, G. Game based Cybersecurity Training for High School Students / G. Jin, M. Tu, T.-H. Kim, J. Heffron, J. White // SIGCSE'18 Proceedings of the 49th ACM Technical Symposium on Computer Science Education. – P. 68–73. – DOI: 10.1145/3159450.3159591.

4. Trickel, E. Shell We Play A Game? CTF-as-a-service for Security Education / E. Trickel, F. Disperati, E. Gustafson et al. // *USENIX Workshop on Advances in Security Education (ASE)*. – 2017. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/319141725_Shell_We_Play_A_Game_CTF-as-a-service_for_Security_Education, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 20.10.2021).
5. Ali Zani, A. A review of security awareness approaches: Towards achieving communal awareness / Editor(s): Vladlena Benson, John Mcalaney / A. Ali Zani, A. Norman, N. Ghani // *Cyber Influence and Cognitive Threats*. – Academic Press, 2020. – P. 97–127. – Режим доступа: <https://aisel.aisnet.org/pacis2018/278>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 20.10.2021).
6. Ариффулина, С. Б. Концепция создания цифрового двойника рабочей программы дисциплины с использованием решений на платформе «1С:Предприятие» / С. Б. Ариффулина, Е. Ю. Кунц, Д. Г. Ли, А. В. Ильенко // *Новые информационные технологии в образовании : сборник научных трудов 21-й Международной научно-практической конференции / под общ. ред. Д. В. Чистова*. – Москва, 2021. – С. 50–52.
7. Kim B.-H. Development of cyber information security education and training system / B.-H. Kim, K.-C. Kim, S.-E. Hong, S.-Y. Oh // *Multimedia Tools and Applications*. – 2017. – № 76 (4). – P. 6051–6064.
8. Джанелли, М. Электронное обучение в теории, практике и исследованиях / М. Джанелли // *Вопросы образования*. – 2018. – № 4. – С. 81–98.
9. Pape, S. Conceptualization of a CyberSecurity Awareness Quiz / S. Pape, L. Goeke, A. Quintanar, K. Beckers // *Proc. ESORICS 2020 International Workshops MSTEC*. – 2020.
10. Sillanpää, M. Social Engineering Intrusion: A Case Study / M. Sillanpää, J. Hautamäki // *Proc. IAIT2020 : The 11th International Conference on Advances in Information Technology*. – 2020. – P. 1–5.
11. Казначеева, Н. В. Прототип цифрового двойника обучающегося для построения индивидуального образовательного маршрута / Н. В. Казначеева, Е. Ю. Кунц, И. О. Сучков, А. Н. Полетайкин // *Современное образование: повышение конкурентоспособности университетов : материалы Междунар. науч.-метод. конф. : в 2 ч., 28–29 января 2021 г., Томск, Россия / отв. ред. В. М. Рулевский*. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2021. – Ч. 1. – С. 89–94.

References

1. Anuryeva, M. S. Sovremennaya sistema obrazovaniya v oblasti informatsionnoy bezopasnosti v Rossiiskoy Federatsii [Modern system of education in the field of information security in the Russian Federation]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University], 2018, no. 3 (173).
2. Tang, S., Hanneghan, M. A Model-Driven Framework to Support Development of Serious Games for Game based Learning. *The 3rd International Conference on Developments in e-Systems Engineering*. London, UK, 2010. DOI: 10.1109/DeSE.2010.23.
3. Jin, G., Tu, M., Kim, T.-H., Heffron, J., White, J. Game based Cybersecurity Training for High School Students. *SIGCSE'18 Proceedings of the 49th ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, pp. 68–73. DOI: 10.1145/3159450.3159591.
4. Trickel, E., Disperati, F., Gustafson, E. et al. Shell We Play A Game? CTF-as-a-service for Security Education. *USENIX Workshop on Advances in Security Education (ASE)*, 2017. Available at: https://www.researchgate.net/publication/319141725_Shell_We_Play_A_Game_CTF-as-a-service_for_Security_Education (accessed 20.10.2021).
5. Ali Zani, A., Norman, A., Ghani, N. A review of security awareness approaches: Towards achieving community awareness / Editor(s): Vladlena Benson, John Mcalaney. *Cyber Influence and Cognitive Threats*. Academic Press, 2020, pp. 97–127. Available at: <https://aisel.aisnet.org/pacis2018/278> (accessed 20.10.2021).
6. Arifullina, S. B., Kunts, E. Yu., Li, D. G., Ilyenko, A. V. Kontseptsiya sozdaniya tsifrovogo dvoynika rabochey programmy s ispolzovaniem resheniy na platforme "1C: Predpriyatie" [The concept of creating a digital double of the discipline's work program using solutions on the 1C platform:Enterprise"]. *Novie informatsionnie tehnologii v obrazovanii : sbornik nauchnykh trudov 21-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [New information technologies in education : Collection of scientific papers of the 21st International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2021, pp. 50–52.
7. Kim, B.-H., Kim, K.-C., Hong, S.-E., Oh, S.-Y., Development of cyber information security education and training system. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, no. 76 (4), pp. 6051–6064.
8. Janelli, M. Electronnoe obuchenie v teorii, praktike i issledovaniyakh [E-learning in theory, practice and research]. *Voprosy obrazovaniya* [Education Issues], 2018, no. 4, pp. 81–98.
9. Pape, S., Goeke, L., Quintanar, A., Beckers, K. Conceptualization of a CyberSecurity Awareness Quiz. *Proc. ESORICS 2020 International Workshops MSTEC*, 2020.
10. Sillanpää, M., Hautamäki, J. Social Engineering Intrusion: A Case Study. *Proc. IAIT2020 : The 11th International Conference on Advances in Information Technology*, 2020, pp. 1–5.
11. Kaznacheeva, N. V., Kunts, E. Yu., Suchkov, I. O., Poletaykin, A. N. Prototype of a student's digital double for building an individual educational route [Prototip tsifrovogo dvoynika obuchaushegosya dlya postroeniya individualnogo obrazovatel'nogo marshruta]. *Sovremennoe obrazovanie: povyshenie konkurentosposobnosti universitetov : materialy Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Modern education: improving the competitiveness of universities : materials of the international scientific methodical conference], in 2 parts, January 28–29, 2021, Tomsk, Russia. Tomsk : Publishing House of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2021, part 1, pp. 89–94.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 519.853, 004.942

ПОИСК СИЛЫ ТОКА И СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ БАРАБАНА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ¹

Статья поступила в редакцию 21.03.2022, в окончательном варианте – 25.04.2022.

Соловьева Инна Александровна, ¹Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106; ²Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33,

¹аспирант, ²ассистент, ORCID: 0000-0002-1798-1859, e-mail: good.win32@yandex.ru

Соловьев Денис Сергеевич, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-6613-3218, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Литовка Юрий Владимирович, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-5792-340X, e-mail: polychem@list.ru

В работе проводится анализ существующих исследований по оптимизации конструктивных параметров барабанов и режимов электролиза для снижения неравномерности гальванического покрытия мелких деталей. На основе проведенного анализа формулируется задача поиска силы тока и степени загрузки барабана для минимизации неравномерности получаемого покрытия. Для поставленной задачи предлагается математическая модель, которая учитывает глубину проникновения тока внутрь барабана и потери металла на истирание. Приводится анализ решения задачи оптимизации путем ее декомпозиции на две подзадачи, решаемые методами «золотого сечения» и пристрелки. Демонстрация решения задачи оптимизации приводится для никелирования установочного цилиндрического штифта М 5х36.

Ключевые слова: неравномерность покрытия, гальванический процесс, барабан, мелкие детали, математическая модель, оптимизация

SEARCH THE CURRENT AND THE DEGREE OF BARREL-SHAPED CAGE LOADING TO REDUCE THE NON-UNIFORMITY FOR THE PLATING COATING OF SMALL DETAILS

The article was received by the editorial board on 21.03.2022, in the final version – 25.04.2022.

Solovjeva Inna A., ¹Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation; ²Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

¹postgraduate student, ²Assistant, ORCID: 0000-0002-1798-1859, e-mail: good.win32@yandex.ru

Solovjev Denis S., Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-6613-3218, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Litovka Yuri V., Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

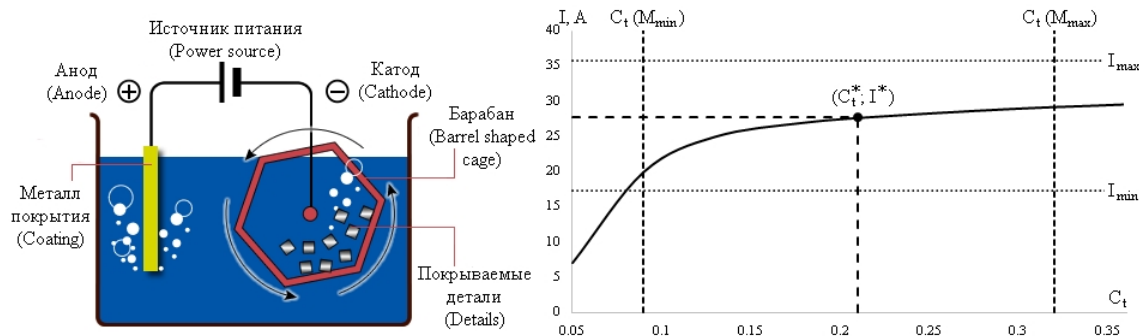
Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-5792-340X, e-mail: polychem@list.ru

The article provides an analysis for existing research on optimizing the design parameters of barrel-shaped cages and electrolysis modes to reduce the coating non-uniformity of small details. The problem of searching the current and the degree of barrel-shaped cage loading to minimize the non-uniformity of the plating coating is formulated on the analysis basis. A mathematical model that considers the current penetration depth into the load and metal losses due to abrasion is proposed to solve the problem. The analysis to the optimization problem solution is carried out by decomposition into two subproblems, which are solved by the golden section and shooting methods. Demonstration of the optimization problem solution is given for nickel plating of the locating cylindrical pin M 5x36.

Keywords: non-uniformity coating; plating process; barrel-shaped cage; small details; mathematical model; optimization

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90019.

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Гальванические покрытия используются для защиты деталей от коррозии, придания им специальных свойств и улучшения внешнего вида [1]. К основным факторам, определяющим качество получаемого покрытия, относится его равномерность [2]. Как правило, гальваническое покрытие наносится путем «подвешивания» покрываемой металлической детали в растворе электролита. Однако данный подход имеет следующие недостатки: трудоемкость «подвешивания» больших объемов мелких деталей; использование подвесок может оставить следы на деталях, что приведет к ухудшению качества гальванического покрытия. Поэтому гальванические покрытия на мелкие детали наносят, как правило, в насыпном виде, загрузив их в ванну с барабаном [3]. Вращающиеся барабаны используются для избавления от трудоемких операций монтажа деталей на подвесочные приспособления, которые снижают производительность технологического процесса в целом. Условие получения покрытия на деталях с использованием вращающихся барабанов имеет существенные отличия от получения покрытия с использованием подвесок [4–6]. В процессе нанесения покрытия детали непрерывно перемешиваются, то есть периодически они могут оказываться на внешней поверхности или внутри загрузки. На поверхности деталей изменяется плотность тока из-за изменения их положения относительно анодов. Вследствие потери контакта с катодными токоподводами или массой загруженных деталей они могут оказываться неполяризованными. Кроме того, происходит механическое взаимодействие деталей друг с другом. Поэтому каждая из одновременно покрываемых деталей может иметь в конце процесса случайное значение толщины, которое обуславливается влиянием совокупности факторов. Исследованию влияния факторов на равномерность толщины получаемого таким способом покрытия посвящено множество работ. В работе [7] исследуется влияние диаметра барабана. В работе [8] исследуется влияние количества отверстий и их размеров на поверхности барабана. В работе [9] исследуется влияние температуры и состава электролита. В работе [10] исследуется влияние скорости вращения барабана и длительности гальванического процесса. Из проведенного анализа следует, что отсутствуют работы, посвященные исследованию влияния силы тока и степени загрузки барабана с использованием математических моделей процесса, которые учитывают глубину проникновения тока внутрь барабана и потери металла на истирание.

Целью статьи является поиск силы тока и степени загрузки барабана для снижения неравномерности гальванического покрытия мелких деталей.

Материалы и методы. Гальванический процесс нанесения покрытия предполагает размещение мелких деталей внутри барабана, изготавливаемого обычно из полипропилена. Барабан содержит центральные стержни, которые проводят электрический ток. Барабан с деталями медленно вращается при погружении в электролитический раствор, тем самым обеспечивая перекачивание деталей. При этом ион металла восстанавливается до металлического покрытия на поверхности деталей под действием электрического поля. В свою очередь свежий раствор электролита снаружи барабана непрерывно поступает внутрь через небольшие отверстия в его стенке, а прореагировавший раствор и водород, образующийся в процессе нанесения покрытия, также выводятся из барабана через них. Сущность гальванического процесса нанесения покрытия на мелкие детали с использованием барабана показана на рисунке 1.

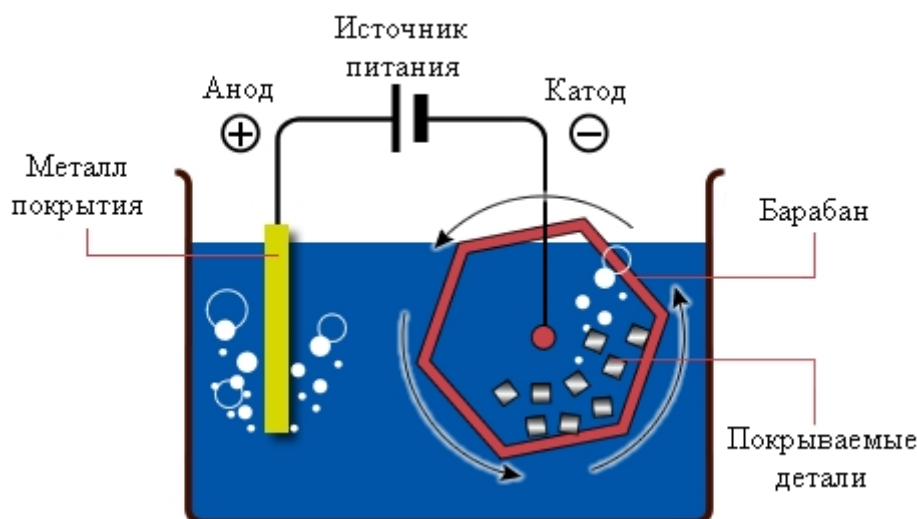


Рисунок 1 – Гальванический процесс нанесения покрытия на мелкие детали с использованием барабана

Критерием оптимизации технологического процесса выступает неравномерность толщины покрытия мелких деталей в барабане. Неравномерность толщины гальванического покрытия определяется согласно:

$$\sigma = K\bar{h}/\sqrt{\Delta\tau}, \quad (1)$$

где K – коэффициент разброса; \bar{h} – средняя толщина покрытия; $\Delta\tau$ – длительность процесса.

Для связи критерия оптимизации с искомой силой тока и степенью загрузки барабана составим математическую модель.

Средняя толщина покрытия определяется согласно закону Фарадея:

$$\bar{h} = k\eta i_a \Delta\tau / [\rho(1 + \xi)], \quad (2)$$

где k – электрохимический эквивалент; η – выход по току; i_a – анодная плотность тока; ρ – плотность; ξ – коэффициент потерь на истирание (0.2...0.4 – для мягких металлов, 0.4...0.6 – для твердых металлов).

В качестве допущения предположим: поверхность внутри барабана представляет собой идеально гладкий цилиндр и загруженные в него детали движутся в режиме переката вокруг центра в точке C (рис. 2). Последнее допущение применимо в случае, когда барабан загружен деталями менее чем на половину.

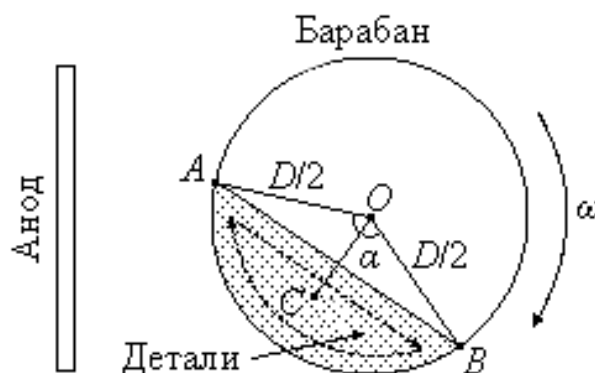


Рисунок 2 – Схема переката деталей внутри барабана

Коэффициент разброса определяется согласно:

$$K = \sqrt{\alpha(\gamma D f - 1) \left(1 + 360 \omega D \sin 0.5\alpha / (c\nu) \right) / (360 \omega E)}, \quad (3)$$

где α – угол к крайним точкам AB области с деталями в барабане; D – диаметр барабана; f – фактор загрузки; ω – скорость вращения барабана; γ – параметр распределения тока; E – эффективность перемешивания; ν – скорость падения деталей.

Угол к крайним точкам AB области с деталями в барабане определяется согласно:

$$\alpha = \arcsin \sin 2C_1 \pi + \sin 2C_1 \pi, \quad (4)$$

где C_1 – коэффициент загрузки барабана.

Параметр распределения тока определяется согласно:

$$\gamma = \sqrt{S_c z F i_0 / (V_c \chi R T)}, \quad (5)$$

где S_c – площадь детали; F – постоянная Фарадея; V_c – объем детали; z – количество электронов; R – универсальная газовая постоянная; χ – удельная электропроводность электролита; i_0 – плотность тока обмена; T – температура электролита.

Фактор загрузки определяется согласно:

$$f = 0.125(\alpha/360 - 0.5/\pi \sin \alpha - V_d/V_b) / (f_0 \cdot \alpha/360 - 1/\pi \sin 0.5\alpha), \quad (6)$$

где f_0 – коэффициент перфорации стенок барабана; V_d, V_b – объемы катодных контактов и барабана.

Эффективность перемешивания определяется согласно:

$$E = 4 \left(1 - (2/3 \cdot \cos 0.5\alpha + 1/3)^2 \right) / (L(\alpha - \sin \alpha)), \quad (7)$$

где L – длина барабана.

Объем барабана определяется согласно:

$$V_b = 0.25\pi L D^2. \quad (8)$$

С одной стороны, коэффициент загрузки барабана определяется согласно:

$$C_t = M / (\rho_m V_b), \quad (9)$$

с другой стороны:

$$C_t = V_b / V_z, \quad (10)$$

где M – масса загрузки; ρ_m – насыпная плотность; V_z – объем загрузки.

Количество деталей определяется согласно:

$$n = [M / M_c], \quad (11)$$

где M_c – масса детали.

Площадь загрузки определяется согласно:

$$S_z = n S_c. \quad (12)$$

При размещении в барабане между деталями образуются зазоры, в связи с чем засыпанные детали представляют собой пористый электрод. Вследствие этого распределение тока неравномерно по всей структуре расположения деталей. Для получения наиболее равномерного покрытия необходимо учитывать факт проникновения тока внутрь загрузки. В качестве допущения примем, что детали, засыпанные в барабан, представляют собой электрод, сечением которого является окружность – эквивалентный электрод (рис. 3а). Тогда площадь деталей в активной зоне (зоне проникновения тока) определяется согласно:

$$S_a = \pi W L S_z (D - W) / V_z, \quad (13)$$

где W – глубина проникновения тока.

Плотность тока на глубине W от внешней поверхности электрода определяется согласно:

$$i = i_a \exp\left(-W \sqrt{r_a^2 S_a \delta / (V_z W)}\right), \quad (14)$$

где δ – перенапряжение на границе «электролит – металл»; r_a – радиус эквивалентного электрода.

Сила тока через площадь деталей в активной зоне определяется согласно закону Ома в дифференциальной форме:

$$I = i_a S_a. \quad (15)$$

Из (14) следует, что глубина проникновения тока внутрь загрузки зависит от отношения площади деталей в активной зоне к объему загрузки. Тогда глубина проникновения тока в барабанах меньшего размера будет выше, чем в барабанах большего размера при одинаковом объеме загрузки (рис. 3б). Таким образом, распределение плотности тока в барабане большего размера будет более неравномерным по сравнению с барабаном меньшего размера.

Радиус эквивалентного электрода определяется согласно:

$$r_a = \sqrt{S_z / \pi}. \quad (16)$$

Перенапряжение на границе «электролит – металл» определяется согласно уравнению Тафеля:

$$\delta = 2.3RT \ln(i_a / i) / (zF). \quad (17)$$

Известно, что в электролитах с высокой рассеивающей способностью получается гальваническое покрытие с наименьшей неравномерностью. Рассеивающая способность определяется согласно:

$$H = (W V_z) / (r_a^2 S_a) \partial \delta / \partial i. \quad (18)$$

На поверхности пористого электрода при $H \geq 1$ распределение плотности тока близко к равномерному. При $H < 1$ из-за концентрации плотности тока вблизи свободной поверхности пористого электрода равномерность снижается.

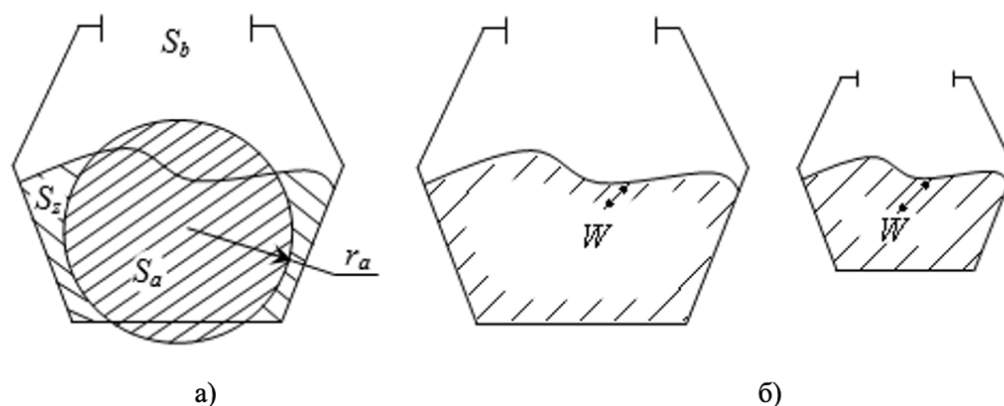


Рисунок 3 – Поперечное сечение барабана с эквивалентным электродом (а) и глубина проникновения тока внутрь загрузки при уменьшении размеров барабана (б)

Сформулируем задачу оптимизации. Найти силу тока I и коэффициент загрузки C_i деталей в барабане, для которых неравномерность (1) гальванического покрытия будет минимальной при уравнениях (2)–(18) и ограничениях:

$$\Delta\tau \leq \tau_{\max}, \quad (19)$$

$$\bar{h} \geq h_{\min}, \quad (20)$$

$$M_{\min} \leq M \leq M_{\max}, \quad (21)$$

$$i_{\min} \leq i_a \leq i_{\max}, \quad (22)$$

где τ_{\max} – максимальная длительность процесса (определяется производительностью гальванической линии в целом); M_{\min} – минимальная масса загрузки (определяется заданной производительностью барабана); h_{\min} – минимальная толщина покрытия, несоблюдение которой приводит к браку детали; M_{\max} – максимальная масса загрузки (обусловлена особенностью конструкции барабана); i_{\max} – предельно допустимая плотность тока, выше которой качество покрытия снижается; i_{\min} – минимальная плотность тока, ниже которой гальваническое покрытие не осаждается.

Проведем анализ влияния ограничений (19), (20) на критерий (1). Согласно уравнению (3), коэффициент разброса не зависит от времени. Тогда с учетом $\Delta\tau = const$ минимальное значение неравномерности толщины гальванического покрытия (1) будет получаться при $\bar{h} = h_{\min}$ в (2). Следовательно, (1) примет вид $\sigma = const/\sqrt{\Delta\tau}$ и будет иметь минимальное значение при $\Delta\tau = \tau_{\max}$. Коэффициент загрузки (3) не зависит от силы тока I , а зависит от степени загрузки C_i . Для расчета I по (15), согласно (13), (14), необходимо знать глубину проникновения тока внутрь загрузки W . Однако для расчета распределения плотности тока i в (14) необходимо знать распределение перенапряжения δ , которое, согласно (17), также зависит от плотности тока. Поэтому для расчета распределения перенапряжения используется формула (15), которая получает первоначальное распределение плотности тока.

Таким образом, задача оптимизации разбивается на две подзадачи: внешнюю и внутреннюю. Внешняя подзадача сводится к одномерной задаче поиска минимума коэффициента разброса одним из методов одномерной оптимизации на отрезке $[M_{\min}/(\rho_m V_b), M_{\max}/(\rho_m V_b)]$. По найденному минимуму коэффициента разброса во внутренней подзадаче определяется распределение перенапряжения одним из методов решения краевых задач и осуществляется поиск значения глубины проникновения тока внутрь загрузки, исходя из распределения плотности тока и перенапряжения.

Экспериментальная часть. Решение задачи оптимизации осуществим на примере поиска силы тока и коэффициента загрузки барабана для никелирования установочного цилиндрического штифта М 5 х 36. В таблице 1 приводятся значения параметров, используемых в расчете уравнений (2)–(18). В таблице 2 приводятся значения ограничений (19)–(22), используемых при решении задачи оптимизации неравномерности гальванического покрытия.

Для решения внешней подзадачи использовался метод «золотого сечения» [11]. Для решения внутренней подзадачи использовался метод пристрелки [12]. Поиск решения задачи оптимизации осуществлялся в разработанном программном обеспечении [13].

Таблица 1 – Значения параметров

Параметр		Значение
Барабан	L , см	60
	D , см	22,5
	ω , об/ч	480
	f_0	0,22
	V_d , см ³	800
	v , см/ч	31500
Деталь	S_c , см ²	6,04
	V_c , см ³	0,71
	M_c , г	5,53
	ρ_m , г/см ³	5
Гальванический процесс	i_0 , А/см ²	0,001
	ε	0,4
	ρ , г/см ³	8,9
	k , г/(А·ч)	1,095
	H	0,97
	Z	2
	T , К	313
	χ , 1/(Ом·см)	0,5
	F , Кл/моль	96484,56
	R , Дж/(моль·К)	8,31

Таблица 2 – Значения ограничений

Параметр		Значение
Барабан	M_{\min} , г	10000
	M_{\max} , г	40000
Гальванический процесс	h_{\min} , МКМ	8
	τ_{\max} , ч	0,5
	i_{\min} , А/см ²	0,015
	i_{\max} , А/см ²	0,030

Результаты и их обсуждение. На рисунке 4 показаны зависимости плотности тока и рассеивающей способности электролита от глубины проникновения тока внутрь загрузки. На глубине $W > 0,93$ см от внешней поверхности S_a плотность тока i отсутствует, а рассеивающая способность электролита снижается ($H < 1$), тем самым увеличивая неравномерность покрытия.

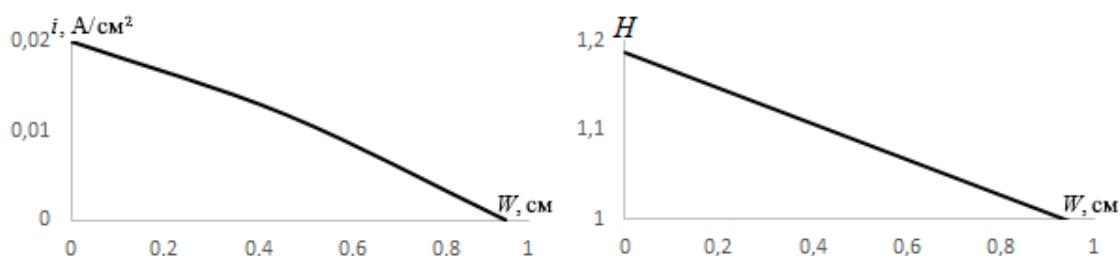


Рисунок 4 – Зависимость плотности тока (слева) и рассеивающей способности электролита (справа) от глубины проникновения тока внутрь загрузки

На рисунке 5 показана область допустимых решений (располагается между прямыми $C_i(M_{\min})$ и $C_i(M_{\max})$, I_{\min} и I_{\max}) и оптимальное решение (C_i^* ; I^*) для задачи оптимизации.

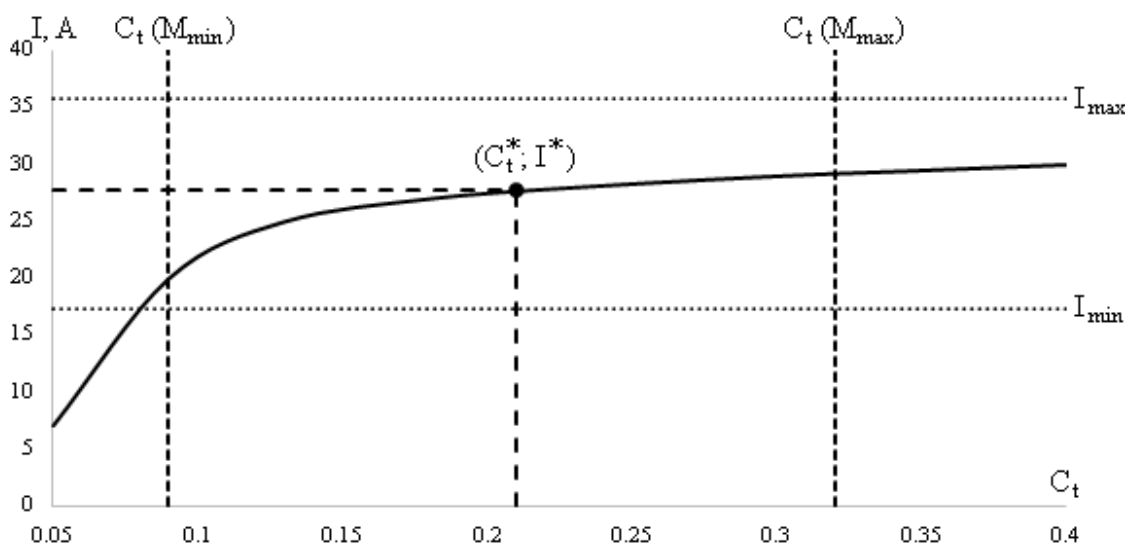


Рисунок 5 – Область допустимых решений и оптимальное решение задачи оптимизации

В таблице 3 приводятся найденные значения параметров в результате решения задачи оптимизации неравномерности гальванического покрытия.

Таблица 3 – Найденные значения параметров

Параметр		Значение
Барабан	C_t	0,21
	$S_z, \text{см}^2$	19270
	$M, \text{г}$	25062
Гальванический процесс	$i_a, \text{А/см}^2$	0,002
	$S_a, \text{см}^2$	1379
	$I, \text{А}$	27,64
	$\sigma, \text{мкм}$	0,508

Таким образом на $n = [M/M_c] = [25062/5,53] = 4532$ деталях установочного цилиндрического штифта $M 5 \times 36$ средняя толщина никелевого покрытия составит $\bar{h} = h_{\min} + \sigma = 8 + 0.508 = 8.508$ мкм.

Заключение. Проблема получения гальванического покрытия с заданной толщиной и минимальной неравномерностью возникает при управлении технологическим процессом. Для гальванического процесса нанесения покрытий на мелкие детали с использованием барабанов имеется ряд специфических особенностей, связанных с необходимостью улучшения качества наносимых покрытий в условиях ужесточающихся требований к ним. Решение проблемы усложняется противоречивостью экспериментальных исследований о воздействии параметров процесса и барабана на равномерность покрытия. Выходом из сложившейся ситуации является оптимизация параметров гальванического процесса и барабана с использованием разработанной математической модели, которая учитывает глубину проникновения тока внутрь барабана и потери металла на истирание. Улучшение качества наносимых покрытий повлечет за собой уменьшение брака и перерасхода металла, что в итоге снизит себестоимость обработки деталей.

Библиографический список

1. Гамбург, Ю. Д. Теория и практика электроосаждения металлов / Ю. Д. Гамбург, Дж. Зангари. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 438 с.
2. Помогаев, В. М. Прогнозирование равномерности осаждения гальванических покрытий / В. М. Помогаев, А. В. Волкович, И. В. Петроченкова, А. Е. Шувакин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50, № 3. – С. 103–106.
3. Singleton, R. Fundamentals of barrel plating / R. Singleton, E. Singleton // Metal Finish. – 2011. – Vol. 109 (8). – P. 14–22.
4. Purcar, M. 3D electrode shape change simulation in electroplating / M. Purcar, C. Munteanu, V. Topa // Revue Roumaine des Sciences Techniques. Serie Electrotechnique et Energetique. – 2013. – Vol. 58. – P. 252–262.
5. Лютов, А. Г. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов / А. Г. Лютов, А. Р. Ишкулова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т. 19, № 4 (70). – С. 45–48.
6. Соловьев, Д. С. Применение решения обратной задачи математического моделирования гальванического процесса для оптимизации неравномерности толщины покрытия / Д. С. Соловьев, И. А. Соловьева, Ю. В. Литовка // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 1 (49). – С. 131–143.

7. Караваев, В. И. Оптимизация гальванических процессов в ваннах с барабанами с целью повышения равномерности покрытия / В. И. Караваев, Ю. В. Литовка // Журнал прикладной химии. – 2004. – Т. 77, № 9. – С. 1481–1486.
8. Han, K. H. Barrel plating process specification for undercoating with copper cyanate / K. H. Han, S. B. Lee, I. K. Hong // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2012. – Vol. 18 (3). – P. 888–897.
9. Hong, I. K. Optimization of barrel plating process for electroless Ni-P plating / I. K. Hong, H. Kim, S. B. Lee // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2014. – Vol. 20 (5). – P. 3767–3774.
10. Yanagishita, T. Fabrication of Porous Si Particles by Barrel Anode Etching / T. Yanagishita, S. Ueno, K. Taniguchi, H. Masuda // Chemistry Letters. – 2016. – Vol. 45 (7). – P. 708–710.
11. Измаилов, А. Ф. Численные методы оптимизации / А. Ф. Измаилов, М. В. Солодов. – Москва : Физматлит, 2008. – 320 с.
12. Самарский, А. А. Численные методы математической физики / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – Москва : Научный мир, 2000. – 358 с.
13. Соловьева, И. А. Оптимизация гальванических процессов для деталей, покрываемых насыпью в барабанах / И. А. Соловьева, Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022613030, дата регистрации 01.03.2022.

References

1. Gamburg, Yu. D., Zangari, G. *Teoriya i praktika elektroosazhdeniya metallov* [Theory and practice of metal electrodeposition]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2015. 438 p.
2. Pomogaev, V. M., Volkovich, A. V., Petrochenkova, I. V., Shuvakin, A. E. Prognozirovaniye ravnomernosti osazhdeniya galvanicheskikh pokrytiy [Uniformity of electroplate deposition prediction]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and chemical technology], 2007, vol. 50, no. 3, pp. 103–106.
3. Singleton, R., Singleton E. Fundamentals of barrel plating. *Metal Finish*, 2011, vol. 109 (8), pp. 14–22.
4. Purcar, M., Munteanu, C., Topa, V. 3D electrode shape change simulation in electroplating. *Revue Roumaine des Sciences Techniques. Serie Electrotechnique et Energetique*, 2013, vol. 58, pp. 252–262.
5. Lutov, A. G., Ishkulova, A. R. Modelirovaniye protsessa naneseniya galvanicheskikh pokrytiy s uchetoм geometricheskikh konfiguratsiy elektrodov [Modeling of plating process in view of geometrical configurations of electrodes]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2015, vol. 19, no. 4 (70), pp. 45–48.
6. Solovyev, D. S., Solovyeva, I. A., Litovka, Yu. V. Primeneniye resheniya obratnoy zadachi matematicheskogo modelirovaniya galvanicheskogo protsessа dlya optimizatsii neravnomernosti tolschiny pokrytiya [Inverse problem solution of the mathematical modeling for galvanic process to optimize the non-uniformity of the coating thickness]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2020, no. 1 (49), pp. 131–143.
7. Karavaev, V. I., Litovka, Yu. V. Optimizatsiya galvanicheskikh protsessov v vannakh s barabanami s tselyu povysheniya ravnomernosti pokrytiya [Optimization of electroplating processes in drum baths to obtain a more uniform coating]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2004, vol. 77, no. 9, pp. 1481–1486.
8. Han, K. H., Lee, S. B., Hong, I. K. Barrel plating process specification for undercoating with copper cyanate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2012, vol. 18 (3), pp. 888–897.
9. Hong, I. K., Kim, H., Lee, S. B. Optimization of barrel plating process for electroless Ni-P plating. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, vol. 20 (5), pp. 3767–3774.
10. Yanagishita, T., Ueno, S., Taniguchi, K., Masuda, H. Fabrication of Porous Si Particles by Barrel Anode Etching. *Chemistry Letters*, 2016, vol. 45 (7), pp. 708–710.
11. Izmailov, A. F., Solodov, M. V. *Chislennyye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 320 p.
12. Samarsky, A. A., Gulín, A. V. *Chislennyye metody matematicheskoy fiziki* [Numerical methods of mathematical physics]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2000. 358 p.
13. Solovyeva, I. A., Solovyev, D. S., Litovka, Yu. V. Optimizatsiya galvanicheskikh protsessov dlya detaley, pokryvaemykh nasypyu v barabanakh [Optimization of electroplating processes for parts coated in bulk barrels]. *Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programm dlya EVM* [The Certificate on official registration of the computer program], no. 2022613030, registration date 01.03.2022.

DOI 10.54398/20741707_2022_2_127
УДК 62: 621.311 + 004.942

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ СУДНА ТИПА КАТАМАРАН

Статья поступила в редакцию 09.03.2022, в окончательном варианте – 28.04.2022.

Шуришев Илья Борисович, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

магистрант, ORCID: 0000-0003-1803-974X, e-mail: piece114@mail.ru

Зайнутдинова Лариса Хасановна, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-7013-9716, e-mail: lzain@mail.ru

Ильичев Владимир Геннадьевич, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

аспирант, ORCID: 0000-0002-2579-0403, e-mail: vova201428@yandex.ru

Новые подходы к реализации стратегий энергетической и судостроительной отраслей создают условия для технологического развития альтернативных источников энергии на водном транспорте. Проведен анализ опыта эксплуатации солнечной электростанции катамарана «Эковолна». Представлена структурная схема солнечной электростанции. Разработана наглядная схема, визуализирующая картину и виды возникших дефектов. В результате использования эмпирического метода научного исследования выявлено, что основной причиной выхода из строя солнечных модулей катамарана «Эковолна» является перегрев фотоэлектрических ячеек и, как следствие, быстрая деградация материала. На основе экспериментов, проведенных с применением тестовой фотоэлектрической системы, установлено, что в полдень температура солнечных модулей в климатических условиях Астрахани достигает высоких температур, более 70 градусов Цельсия. Разработана система водяного охлаждения солнечных модулей, не требующая каких-либо сосудов для хранения рабочей жидкости, так как в качестве хладагента предложено использование заборной воды. Предложена комплектация компонентов солнечной электростанции. Проведен расчёт выработки электроэнергии солнечной электростанции с применением специализированной программы «RealSolar». Показано, что выработка электроэнергии за счет солнечных модулей полностью перекрывает затраты энергии на электропривод катамарана в период с мая по август. С помощью программы Polysun дана оценка снижения выбросов CO₂ в атмосферу. Предлагаемый проект солнечной электростанции катамарана позволит сократить выбросы CO₂ в атмосферу на 7171,5 кг в год.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии, солнечная электростанция, энергоэффективность, солнечный модуль, контроллер, аккумулятор, охлаждение солнечных модулей, водный транспорт

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A CATAMARAN-TYPE SOLAR POWER PLANT

The article was received by the editorial board on 09.03.2022, in the final version – 28.04.2022.

Shurshov Ilya B., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, master student, ORCID: 0000-0003-1803-974X, e-mail: piece114@mail.ru

Zaynutdinova Larisa Kh., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Pedagogy), Cand. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-7013-9716, e-mail: lzain@mail.ru

Ilyichev Vladimir G., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, postgraduate student, ORCID: 0000-0002-2579-0403, e-mail: vova201428@yandex.ru

New approaches to implementing strategies of energy and shipbuilding industries forge conditions for the technological development of alternative energy sources in water transport. The operating experience of the solar power plant for "Eco-wave" ("Ekovolna") catamaran was analyzed. A block diagram of a solar power plant was presented. A visual scheme was developed that visualizes the picture and types of defects that arose. As a result, it was revealed that the key reason for the failure of the solar modules of "Ekovolna" catamaran is the overheating of photovoltaic cells. This leads to rapid degradation of the material. Based on experiments conducted using a test photovoltaic system, it was found that at noon the temperature of solar modules in the climatic conditions of Astrakhan reaches high temperatures, i.e. more than 70 °C. A water-cooling system for solar modules was developed that does not require any vessels for storing the working fluid, since the use of seawater as a refrigerant was suggested. A complete set of components for a solar power plant was proposed. Electricity generation of a solar power plant using RealSolar software was calculated. Generation of electricity was shown to completely cover the energy costs for the electric drive of the catamaran in the period from May to August due to solar modules. With Polysun software, the reduction of CO₂ emissions into the atmosphere was assessed. The proposed catamaran solar power plant project is expected to reduce CO₂ emissions into the atmosphere by 7171.5 kg per year.

Keywords: alternative energy sources, solar power plant, energy efficiency, solar module, controller, battery, solar modules cooling, water transport

ситуации и разработке предложений по повышению энергоэффективности солнечной электростанции судна типа катамаран.

Было рассмотрено, как именно солнечные модули подключались между собой и как они были связаны с остальным оборудованием. Обследование технического состояния станции производилось в следующем порядке: измерены напряжения на всех солнечных панелях; выявлены панели с просадками напряжения; установлено исчезновение генерации одной из панелей. На некоторых панелях напряжение превышало номинальное значение холостого хода ($\sim 25 \pm 0,5$ В). На рисунке 1 представлена схема расположения солнечных панелей на крыше катамарана, показана привязка групп панелей к соответствующим контроллерам, а степень выявленных дефектов отражена в цвете.

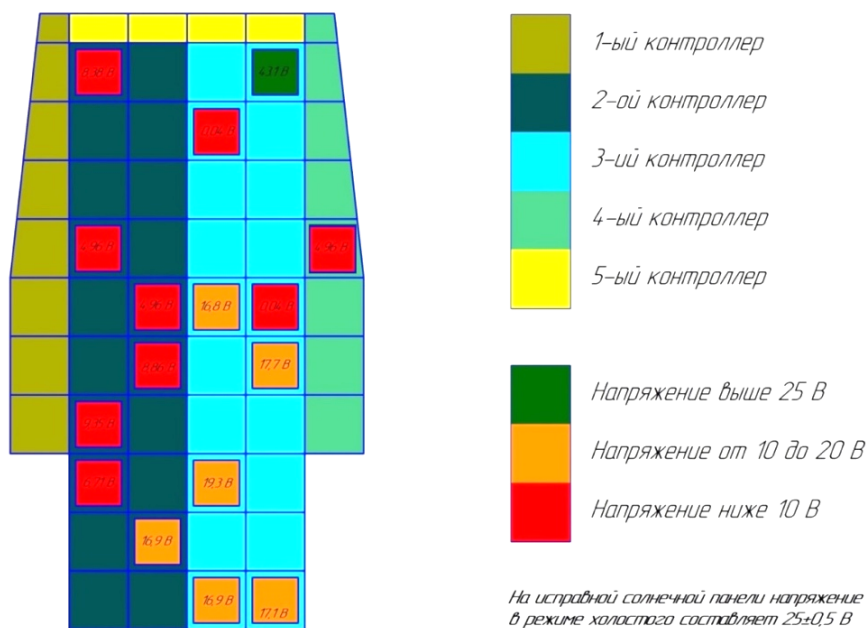


Рисунок 1 – Группы солнечных панелей на крыше катамарана. Напряжение холостого хода дефектных панелей

В работе аккумуляторов, инверторов, батарейного монитора неисправностей не обнаружено. На аккумуляторах выдавалось напряжение в пределах 3,28 В.

В результате проведенного нами обследования было выявлено, что основной причиной выхода из строя солнечных модулей катамарана «Эковолна» является перегрев фотоэлектрических ячеек и, как следствие, быстрая деградация материала. Наибольшая деградация произошла в 2019 г., когда катамаран эксплуатировался в условиях южного региона в чрезвычайно жаркое время. В 2018 г., когда путь катамарана проходил большей частью по северной и центральной частям России, нарушений в работе солнечной электростанции не наблюдалось.

Известно, что на производительность солнечных модулей сильно влияет температура [4, 5]. Исследования, проведенные в работе [6], показали существенное влияние температуры на вольтамперные характеристики фотоэлектрического модуля (рис. 2).

Из графика, представленного на рисунке 2, видно, что с ростом температуры происходит смещение точки максимальной мощности. Рост температуры приводит к снижению напряжения холостого хода и к снижению максимально достижимого значения выходной мощности (рис. 3).

Для оценки снижения выработки фотоэлектрических модулей принято использовать понятие температурного коэффициента. Этот коэффициент показывает, на сколько процентов снижается эффективность фотоэлектрического модуля при возрастании температуры на один градус. Производители солнечных панелей определяют коэффициент полезного действия фотоэлектрического модуля при температуре $+25$ °С и эталонном значении освещенности на плоскости 1000 Вт/кв.м.

Значения температурного коэффициента номинальной мощности фотоэлектрических модулей разных типов, как правило, лежат в диапазоне от $-0,2$ до $-0,6$ %.

В климатических условиях Астраханской области в летний период собственная температура фотоэлектрического модуля может достигать высоких значений (до плюс 70 °С). Это значит, что снижение отдаваемой мощности составит порядка 20 %. Следовательно, соблюдение тепловых режимов оказывает существенное влияние на энергоэффективность солнечных панелей.

Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях рассмотрены в работе [7] Тепловые характеристики гибридной солнечной установки представлены в работе [8]. Влияние температуры на эффективность работы солнечного модуля рассмотрено также в работе [9].

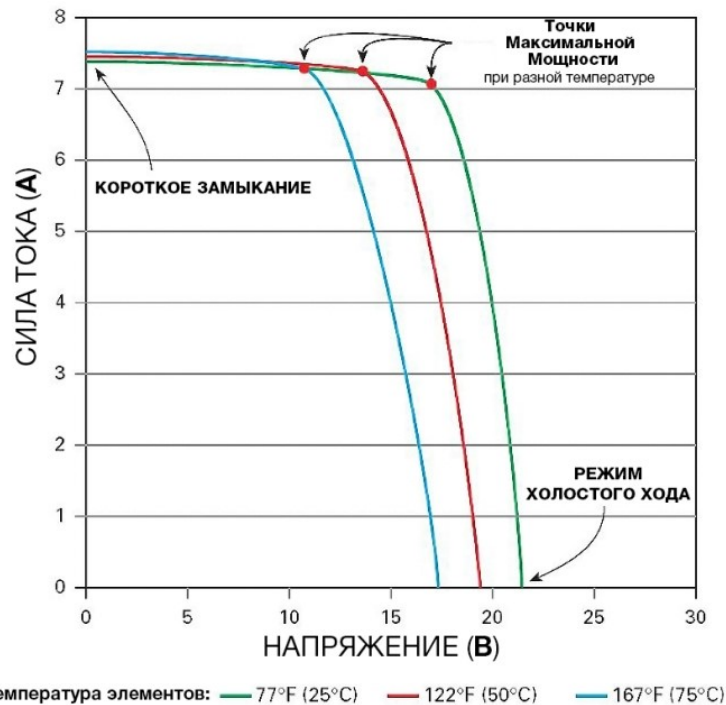


Рисунок 2 – Вольтамперные характеристики фотоэлектрического модуля. Положение точки максимальной мощности в зависимости от температуры [6]

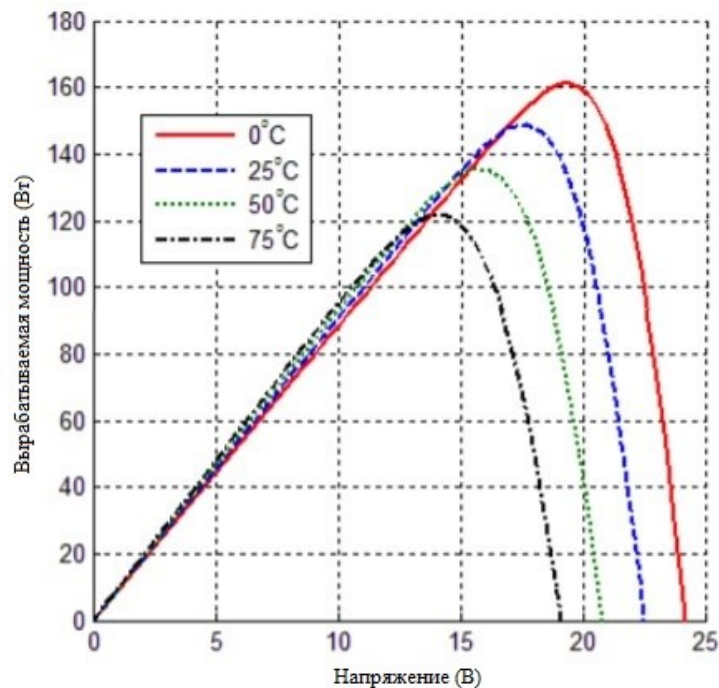


Рисунок 3– Зависимость выходной мощности фотоэлектрического модуля от нагрузки и от температуры [6]

Согласно нашим экспериментам, проведенным с применением имеющейся в нашем распоряжении тестовой фотоэлектрической системы [10], в полдень температура солнечных модулей в условиях Астрахани на солнце достигает высоких температур, более 70 градусов Цельсия (рис. 4).

В связи с высокими температурами окружающей среды исследование эффективности солнечных модулей в климатических условиях Астраханской области, несомненно, актуально. В работе [11] мы убедились в достаточной эффективности сетевой солнечной электростанции офисного здания. В работе [12],

используя нашу пилотную тестовую фотоэлектрическую систему, мы показали, что деградация солнечных модулей при условии их просторного размещения и хорошего естественного воздушного охлаждения может быть сравнительно небольшой.

Однако, как мы уже отмечали выше, деградация солнечных модулей системы электроснабжения катамарана «Эковолна», испытанной в жарких климатических условиях Астраханской области, оказалась существенной.

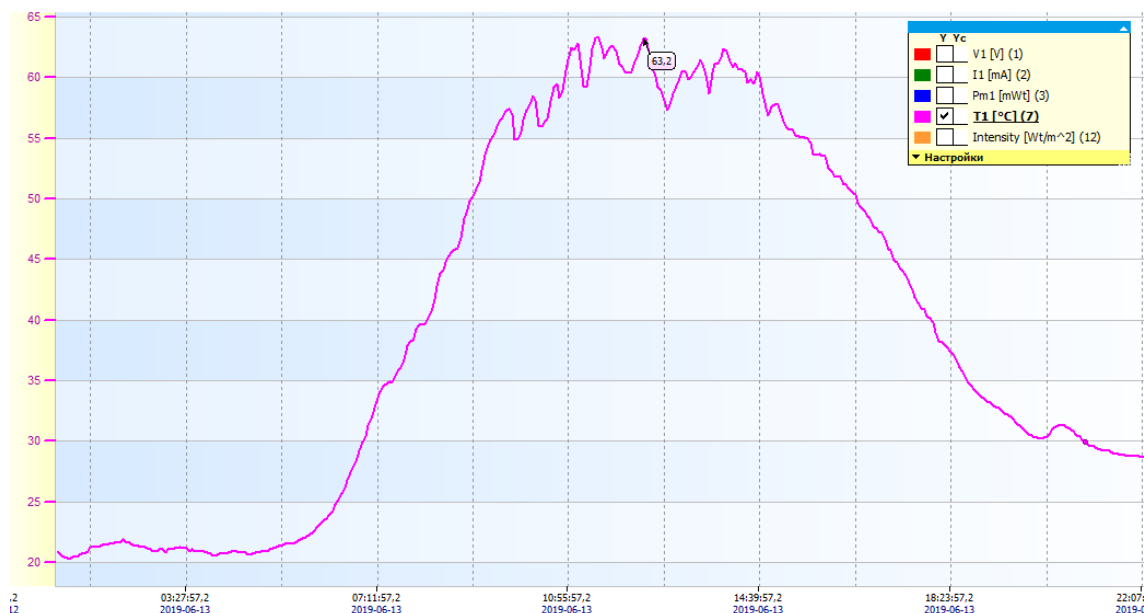


Рисунок 4 – График температуры модуля в течение дня (Астрахань, 2019-06-13)

Выбор солнечных модулей. Достаточно важным моментом в модернизации системы электроснабжения катамарана «Эковолна» является подбор солнечных модулей. Обоснованием этого являются экстремально высокие температуры воздуха и уровни инсоляции в летний период на территории Астраханской области. Также необходимо учитывать специфику использования солнечных модулей. Так как они устанавливаются на крыше судна, то с каждым килограммом изменяется коэффициент остойчивости.

Ранее на катамаране были установлены солнечные панели Nevel 5 Busbar. Поскольку эти модули показали себя неустойчивыми к перегреву, было принято решение провести сравнение более современных модулей и обосновать переход к другому типу модулей. В итоге мы выбрали экспериментальные модули от НТЦ ТПТ с характеристиками, представленными в таблице 1.

Таблица 1– Характеристики модулей НТЦ ТПТ

Характеристика	Значение
Длина	1035 ± 10 мм
Ширина	995 ± 5 мм
Ток короткого замыкания	Isc = 8,79 А
Напряжение холостого хода	Voc = 26,18 В
Ток в рабочей точке	Impp = 8,21 А
Напряжение в рабочей точке	Vmpp = 21,71 В
Мощность в рабочей точке	Pmpp = 178,2 Вт

Упомянутые модули специально разрабатывались для использования на судах, в их конструкции учтена возможность длительного перегрева до температур более чем 70 градусов Цельсия. Вместо 40 старых центральных модулей мы сможем установить 48 новых модулей и получим при этом дополнительные 640 Вт. Также предлагаем заменить старые боковые модули на новые и дополнительно добавить по 3 с каждой стороны, таким образом удастся увеличить выработку на 510 Вт. Нам удастся поднять мощность с 10590 до 11740 Вт, увеличение составит 1150 Вт. Исходное и новое расположение солнечных модулей на крыше катамарана приведено на рисунке 5.

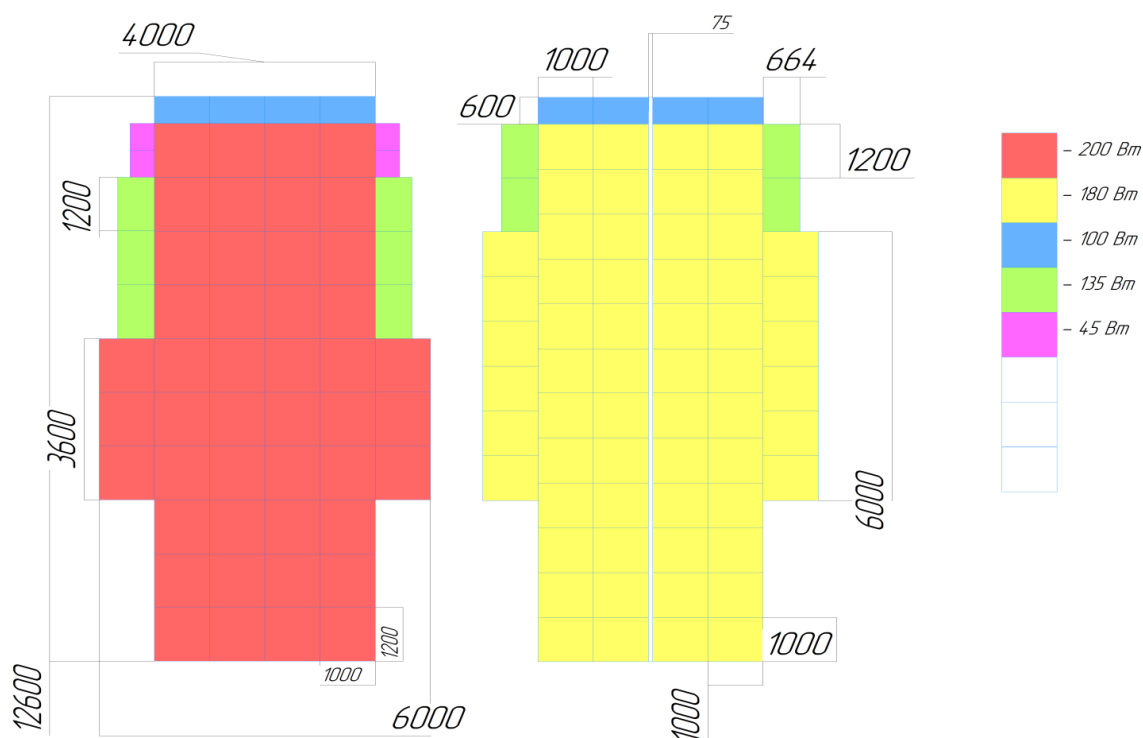


Рисунок 5 – Исходное (слева) и новое (справа) расположение солнечных модулей на крыше катамарана

Таким образом, благодаря подбору новых солнечных модулей и их новой компоновке мы получили возможность увеличения мощности солнечной станции до 11,7 кВт.

Выбор контроллера. Современные реалии диктуют нам выбор контроллера. Поскольку в площади расположения солнечных модулей мы ограничены площадью крыши катамарана и понятиями безопасности судоходства, то у нас не остаётся выбора, как использовать именно MPPT-контроллер, обеспечивающий максимум мощности, отдаваемой нагрузке. Нами был выбран контроллер VENUS-M4860N китайской компании Helios (характеристики представлены в таблице 2)

Таблица 2 – Характеристики контроллера VENUS-M4860N

Характеристика	Значение
Модель №.	VENUS-M4860N
Напряжение аккумуляторной системы	12V/24V/36V/48V Auto (FLD/GEL/SLD) Manual (Li/User)
Потери холостого хода	12ma (12V), 10ma (24V), 8ma (36V), 6ma (48V)
Максимальное входное напряжение солнечной батареи	<150V
Номинальный ток заряда солнечной батареи	100A
Максимальная входная мощность солнечной энергии	1800W/12V 2600W/24V 3200W/36V 6400W/48V
Максимальный выходной ток нагрузки	25A
Рабочая Температура	-35°C ~ +45°C
Защита IP	IP32
Вес	5.0 kg
Размер контроллера	280*210*90 mm

Особенностью контроллера VENUS-M4860N является то, что производитель изначально закладывает завышенные номинальные значения электронных компонентов, что позволяет снизить нагрев самого контроллера. Также эти контроллеры можно назвать «умными», ибо к ним можно подключиться по блютузу. Кроме того, они сохраняют информацию о выработке, входном и выходном напряжении и многие другие показания, что будет полезно при проведении научных исследований. В перспективе нас интересует исследование влияния температуры модулей на выработку электроэнергии. Поскольку мы планируем в дальнейшем проводить сравнение выработки одной половины модулей, работающих с водяным охлаждением, с выработкой другой половины модулей, работающих без охлаждения, то мы устанавливаем отдельные контроллеры на каждую половину крыши.

Выбор аккумуляторов. В общедоступных и даже специализированных источниках нет однозначных рекомендаций по выбору аккумуляторов для судов. Многие суда на альтернативных источниках энергии используют литий-железо-фосфатные аккумуляторы, но также есть примеры применения литий-ионных, литий-полимерных и никель-металлогидридных аккумуляторов. В результате безуспешного поиска готового ответа на вопрос, нами было решено провести оценку применимости к нашему объекту наиболее распространённых видов аккумуляторов. Характеристики разных видов аккумуляторов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики аккумуляторов

Характеристики	NiCd	NiMH	Lead Acid	Li-ion	Li-ion polymer	LiFePo4
Плотность энергии (Вт*час/кг)	45–80	60–120	25–40	110...270	100–130	90–160
Внутреннее сопротивление, мОм	100–200 6V	200–300 6V	< 100 12V	150–250 7,2V	200–300 7,2V	150–250 7,2V
Время быстрого заряда	1 час	2–4 часа	8–16 часов	2–4 часа	2–4 часа	2–4 часа
Рабочая температура	–40–60 °C	–20–60 °C	–40–40 °C	–20–60 °C	–20–60 °C	–30–55 °C
Время жизни (до 80 % от номинальной емкости)	1500	300–500	200–300	500–1000	300–500	500–1000
Чувствительность к перезаряду	средняя	высокая	низкая	очень высокая	высокая	высокая
Примерная стоимость	50\$	60\$	25\$	100\$	100\$	100\$

Все приведенные виды аккумуляторов имеют свои достоинства и нашли свою нишу использования. В случае нашего объекта, являющегося водным прогулочным-транспортным средством, применение никель-кадмиевых (NiCd) аккумуляторов нежелательно ввиду того, что они содержат токсичные материалы. Никель-металлогидридные (NiMH) аккумуляторы имеют малое время жизни. Герметичные свинцово-кислотные (SLA) имеют слишком большой вес.

В исходном варианте на катамаране «Эковолна» были установлены литий-железо-фосфатные аккумуляторы Лиотех LT-LYP(LFP)380 в количестве 64 штук. Поскольку масса данных батарей слишком велика, было принято решение заменить их на более энергоёмкие литий-ионные аккумуляторы, имеющие меньший вес.

Проанализировав рынок литий-ионных аккумуляторов, мы пришли к решению использовать аккумуляторные батареи с автомобиля «Тесла» (основные характеристики представлены в таблице 4).

Таким образом, подобраны современные и надёжные компоненты для энергосистемы судна:

- солнечные панели НТЦ ТПТ (68 шт.);
- контроллеры Helios Venus (4 шт.);
- аккумуляторы Tesla 4680 (22 шт.).

Разработанная структурная схема солнечной электростанции катамарана представлена на рисунке 6.

Перечень оборудования разработанной СЭС:

1. Солнечные панели:

- экспериментальные модули от НТЦ ТПТ 180 Вт – 60 шт.;

Солнечные панели Hevel Solar:

- мощностью 135 Вт – 4 шт.;
- мощностью 100 Вт – 4 шт.

2. МРРТ-контроллер VENUS-M4860N – 4 шт.

3. Инвертор МАП «DOMINATOR» 48/220 9 кВт – 2 шт.

4. Аккумуляторная батарея с автомобиля «Тесла» – 22 шт.
5. BMS-Микроарт – 16 шт.
6. Аккумуляторная батарея VARTA Silver Dynamic 110Ah 920A – 1 шт.
7. Зарядное устройство «Вымпел 325» – 1 шт.
8. MPPT-контроллер EPSolar 2215R Tracer – 1 шт.
9. Монитор батарейный Victron Energy BMV-700 – 1 шт.

Таблица 4 – Характеристики аккумуляторной батареи «Тесла»

Характеристики при 25 °С (*)	
Номинальная емкость, А·ч	287
Номинальное напряжение, В	24,7
Удельная энергия по массе, Вт·ч/кг	228
Рекомендованные режимы эксплуатации	
Заряд при температуре, °С	от 0 до +30
Разряд при температуре, °С	от –30 до +50
Предельные рабочие режимы	
Максимальное напряжение заряда, В	30,1
Минимальное напряжение на аккумуляторе, В	19,3
Заряд при температуре, °С	от –10 до +30
Разряд при температуре, °С	от –40 до +55
Хранение при температуре, °С	от 0 до +30
Ресурс, заряд/разряд при глубине разрядки до 80 %, циклов	6000

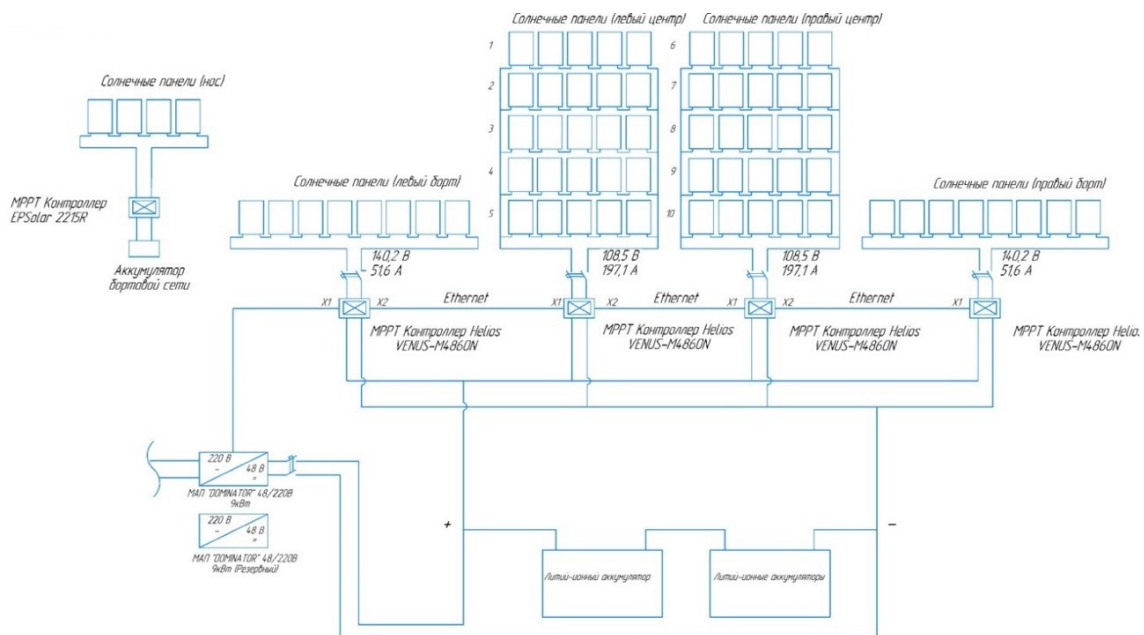


Рисунок 6 – Структурная схема солнечной электростанции катамарана

Разработка системы охлаждения солнечных модулей. С целью повышения эффективности работы фотоэлектрической станции судна типа катамаран нами была поставлена задача разработки системы охлаждения солнечных модулей. Известны пассивные и активные методы охлаждения фотоэлектрических модулей. Пассивное охлаждение – это технология, при которой снижение температуры фотоэлектрического модуля осуществляется без дополнительного энергопотребления. При активном охлаждении отвод тепла осуществляется с использованием устройств для нагнетания воздуха или подачи воды на панели, что требует некоторых энергозатрат.

Большой вклад в изучение вопросов снижения температуры поверхности солнечных модулей с целью повышения их энергоэффективности внесен сотрудниками Южно-Уральского государственного университета [13]. Эта научная школа отдает предпочтение пассивным технологиям охлаждения. Существенная зависимость энерговыработки фотоэлектрических модулей от температуры поверхности модуля представлена также в работе [14].

Принято считать, что воздушное охлаждение менее эффективно для извлечения тепловой энергии из фотоэлектрического модуля в жарких регионах. Водяное охлаждение при высоких температурах работает лучше и позволяет более эффективно использовать рекуперацию отработанного тепла. В работе [15] проводится сравнение эффективности непрерывного и периодического водяного охлаждения. В лабораторных условиях [16] проведено экспериментальное сравнение энергоэффективности двух модулей, один из которых подвергался непрерывному водяному охлаждению. Повышение выработки электроэнергии при подаче потока охлаждающей воды через переднюю часть модуля показано в работе [17]. Охлаждение фотоэлектрического модуля путем полного погружения в воду [18], конечно же, эффективна в плане выработки, но сильно усложняет условия эксплуатации и, по-видимому, в дальнейшем приведет к сокращению срока службы модуля. В лабораторных условиях исследование эффективности водяного охлаждения проведено в работе [19]. Анализ известных работ показал, что нет одного-единственного оптимального решения для охлаждения солнечных модулей. Выбор решения зависит от ряда факторов: от расположения системы, используемой фотоэлектрической технологии, структуры ячеек и погодных условий [20, 21]. Поэтому выбор той или иной системы охлаждения солнечных модулей должен приниматься с учетом специфики конкретных объектов.

Изучив опыт различных лабораторий и научно-исследовательских центров, мы пришли к выводу, что наиболее целесообразной и оптимальной в случае солнечной электростанции водного судна типа катамаран будет система активного охлаждения солнечных панелей с использованием забортной воды. Однократная подача и дальнейшее испарение воды может намного больше отвести тепла, чем воздушное или же иные пассивные виды охлаждения.

Нами разработана следующая система охлаждения солнечных панелей на крыше катамарана. На рисунке 7 показан принцип действия системы, а на рисунке 8 – структурная схема.

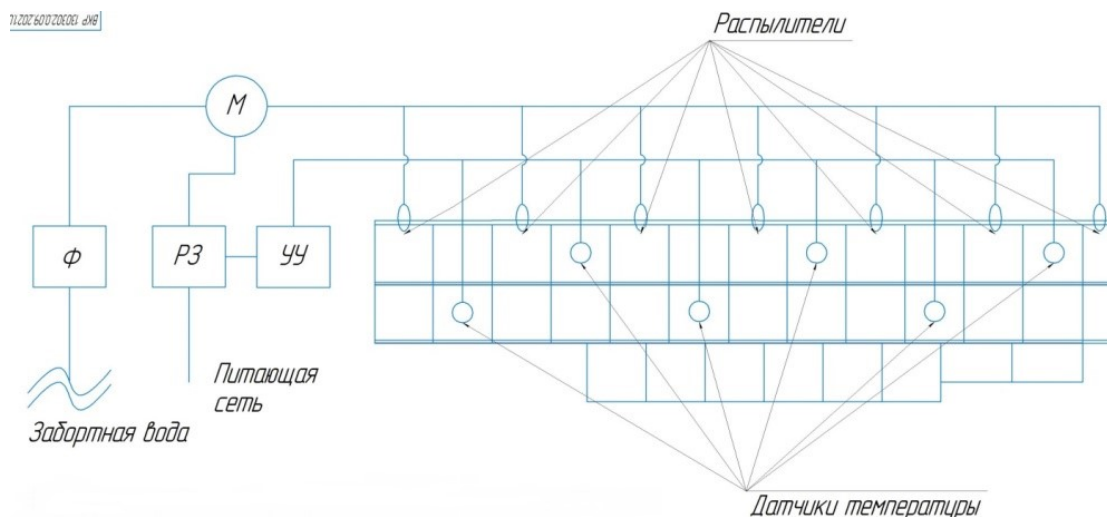


Рисунок 7 – Графическое представление принципа действия системы охлаждения солнечных панелей

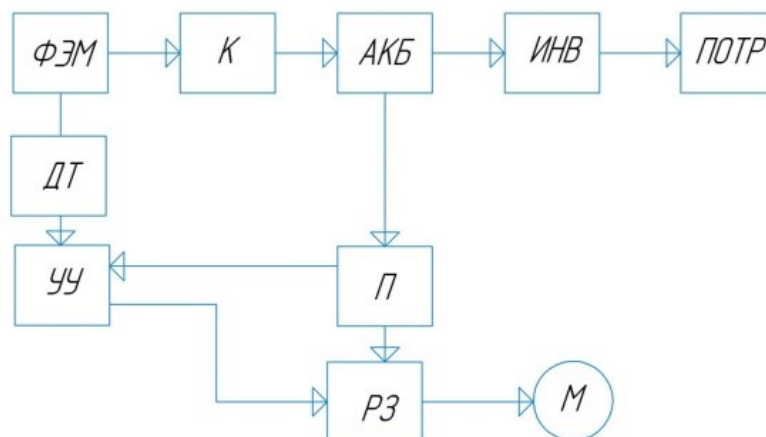


Рисунок 8 – Структурная схема системы охлаждения: ФЭМ – фотоэлектрические модули; к – контроллер; акб – аккумуляторные батареи; инв – инвертор; потр – потребитель; дт – датчики температуры; уу – управляющее устройство; п – преобразователь; рз – реле замыкающее; м – мотор (электронасос); ф – фильтр (заборной воды)

Электрическая энергия, выработанная фотоэлектрическими модулями (ФЭМ), поступает на контроллер (К) и сохраняется в аккумуляторах (АКБ). Далее с аккумулятора электричество поступает на преобразователь (П), который передаёт его на управляющее устройство (УУ) и реле замыкания (РЗ). В свою очередь, управляющее устройство получает сигналы с датчиков температуры, которые крепятся к тыльной стороне солнечных панелей. При достижении температуры выше $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ управляющее устройство замыкает реле и питание приходит на мотор электронасоса (М). Закачанная заборная вода проходит фильтрацию и распыляется с помощью распылителей.

Расчет мощности и подбор электронасоса

Площадь всех солнечных модулей на крыше катамарана $65,6\text{ м}^2$.

Толщина водяной плёнки не более $1\text{ мм} = 0,001\text{ м}$.

Объём воды, покрывающей крышу, $65,6 \cdot 0,001 = 0,0656\text{ м}^3$.

Полный объём воды $0,0656\text{ м}^3$ на крыше. Также раз в день необходимо полностью прокачать систему, включая трубу, объём которой $0,3\text{ м}^3$.

Опытным путём на основе эксперимента на тестовой фотоэлектрической станции было определено, что достаточные интервалы включения насоса системы охлаждения составляют каждые 5 минут из 25 минут. То есть полный цикл срабатывания системы составляет 25 минут, из которых в течение 5 минут идёт распыление воды.

Из графика, представленного на рисунке 4, можно сделать заключение, что температура больше $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ держится около 10 часов в день, следовательно, это тот период, в который и надо охлаждать модули. Исходя из цикла работа – отдых, сможем подсчитать, сколько часов в течение этого дня проработает насос.

$$10\text{ ч} \cdot 60/25 = 24\text{ цикла.}$$

Тогда время работы насоса в течение дня составит 2 часа ($24 \cdot 5 = 120$ минут).

Предложено использование струйного центробежного самовсасывающего насоса Calpeda NGX 2/80, технические характеристики которого приведены в таблице 5. Насос подходит для чистой воды и жидкостей небольшой загрязнённости.

Таблица 5 – Характеристики насоса Calpeda NGX 2/80

Производительность мин., $\text{м}^3/\text{ч}$	0,3
Производительность макс., $\text{м}^3/\text{ч}$	3,2
Напор мин., м	18
Напор макс., м	43
Мощность, кВт	0,55
Напряжение, В	380

Потребление электроэнергии насосом за весь жаркий июньский день составит:

$$550\text{ Вт} \cdot 2\text{ ч} = 1100\text{ Вт}\cdot\text{ч} = 1,1\text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

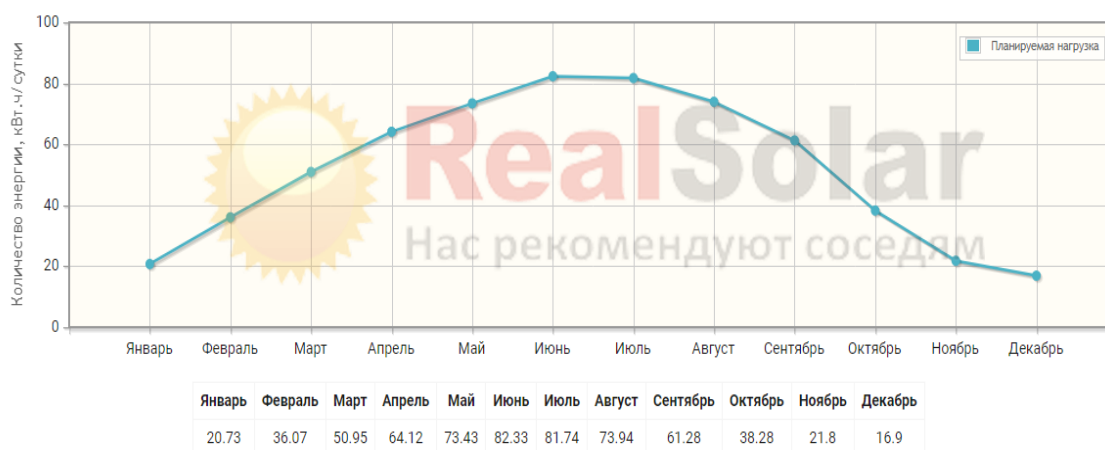
Как уже отмечалось выше, КПД фотоэлектрического модуля зависит от его температуры. Согласно нашим расчетам, выработка электроэнергии от солнечной станции, состоящей из 68 солнечных модулей, при инсоляции $I = 1000\text{ Вт}/\text{м}^2$, температуре $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, за 5 часов будет равна $E = 58,5\text{ кВт}\cdot\text{ч}$. При температуре $t = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ выработка за 5 часов снизится на 19,5 % и составит $47,095\text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Снижение выработки

составит 11,4 кВт·ч. Использование системы охлаждения позволит избежать этого снижения. При этом электропотребление насоса системы охлаждения (1,1 кВт·ч) на порядок ниже. Таким образом, примененные системы охлаждения энергетически эффективно.

Внедрение предложенной системы активного охлаждения позволит избежать снижения выработки в условиях высоких температур окружающей среды, поможет избежать перегрева, снизит деградацию фотоэлектрических ячеек и, что особенно важно, увеличит срок службы солнечных модулей.

Очевидными плюсами предложенной системы охлаждения являются её малый габарит и, как следствие, малый вес. Поскольку в качестве охлаждающей жидкости используется забортная вода, то данной системе не требуется какой-либо резервуар (сосуд) для хранения рабочей жидкости, что, в свою очередь, положительно сказывается на характеристиках и ходкости судна.

Расчет выработки электроэнергии. Для расчёта выработки электроэнергии солнечной электростанции нами была применена специализированная программа «RealSolar». Эта программа предоставляет и использует для расчетов данные солнечной инсоляции в любой точке земного шара. Точность местоположения составляет 0,1 градус долготы и широты. Также есть возможность выбирать модель и количество солнечных батарей. Есть возможность задать произвольный (необходимый) угол наклона солнечных панелей. Расчетные значения выработки энергии солнечной электростанции, полученные с помощью этой программы, представлены на рисунке 9. Среднегодовое значение выработки электроэнергии составляет 56,10 кВт·часов в сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год – 20466,13 кВт·ч.



Среднегодовая выработка электроэнергии: 56.10 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 20466.13 кВт·ч.

Рисунок 9 – Выработка электроэнергии солнечной электростанцией

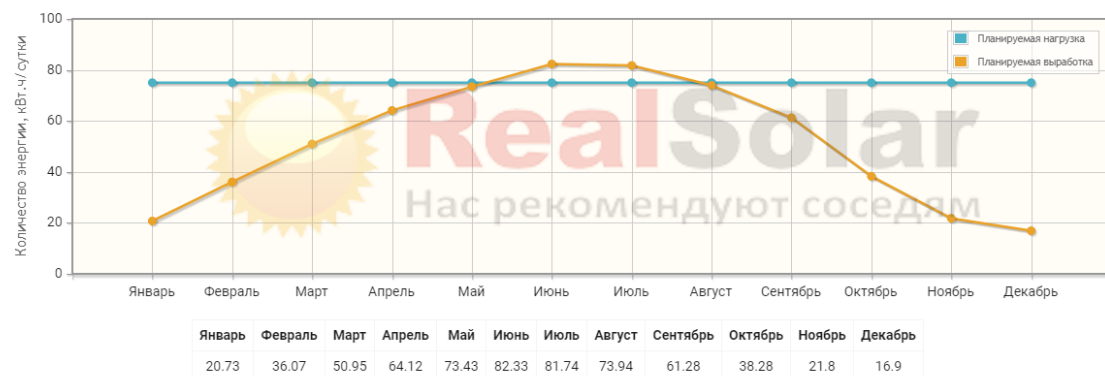
На рисунке 10 показан помесячный график выработки электроэнергии солнечной электростанцией и график планируемой нагрузки при непрерывной работе электропривода в номинальном режиме в течение 5 часов в сутки в климатических условиях Астраханской области.

Угол наклона: 5

Другой прибор 1 Шт × 15000 Вт × 5 часов в сутки 75.00 кВт·ч/сутки

Средняя нагрузка: 75.00 кВт·ч/сутки

4 Выработка солнечной электростанции по месяцам
Оцените по графикам - достаточно ли вам энергии которую выработают солнечные батареи



Среднегодовая выработка электроэнергии: 56.10 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 20466.13 кВт·ч.

Рисунок 10 – Графики выработки и нагрузки (время непрерывной работы электропривода при номинальной мощности 5 часов в сутки)

Таким образом, выработка электроэнергии за счет солнечных модулей полностью перекрывает затраты энергии на электропривод катамарана в период с мая по август, что вполне приемлемо для прогулочного судна и для целей проведения натуральных научных исследований.

Экология. Благодаря предложенной системе охлаждения эффективность работы фотоэлектрических модулей и срок их службы повысятся, что сделает применение солнечных электростанций для электроснабжения судов более привлекательным. А это, в свою очередь, будет способствовать улучшению экологичности водного транспорта.

В настоящее время, когда электроэнергия на судах вырабатывается преимущественно с помощью дизель-генераторов, имеют место заметные токсичные выбросы, ухудшающие экологическую обстановку, что особенно заметно при работе водного транспорта вблизи городов и населенных пунктов.

В нашем случае научно-исследовательское и прогулочное судно типа катамаран может доставлять заказчиков в особо охраняемые природные зоны Астраханской области, в связи с чем минимизация выбросов от дизель-генератора является весьма актуальной.

Как известно, применение солнечных электростанций не приводит к загрязнению воздушной среды. Постепенный переход к возобновляемым источникам позволит улучшить нынешнее экологическое состояние в регионе.

На водном транспорте частично решить экологические проблемы можно переходом от традиционной энергетики к возобновляемым источникам энергии, и в первую очередь к солнечной энергетике.

С помощью программы Polysun удалось вычислить, что предлагаемый проект солнечной электростанции катамарана позволит сократить выбросы CO₂ в атмосферу на 7171,5 кг в год.

Заключение. Показана актуальность технологического развития альтернативных источников энергии на водном транспорте. Изучен опыт экспедиции «Эковолна» в аспекте энергообеспечения катамарана на основе солнечных модулей. В первую навигацию, проходившую с мая по август 2018 г. в климатических условиях северной и центральной России, эффективность работы солнечной электростанции сомнений не вызвала. Вторая навигация состоялась в июле 2019 г. и проходила по маршруту Астрахань – Ростов – Астрахань в условиях высоких температур окружающей среды. Вторая навигация сопровождалась существенным снижением выработки солнечной электростанции.

В результате проведенного обследования было выявлено, что основной причиной выхода из строя солнечных модулей катамарана «Эковолна» является перегрев фотоэлектрических ячеек и, как следствие, быстрая деградация материала.

Согласно экспериментальным данным, полученным нами с применением тестовой фотоэлектрической системы, в полдень температура солнечных модулей в условиях Астрахани на солнце достигает высоких температур, более 70 градусов Цельсия.

Разработана система водяного охлаждения солнечных модулей, не требующая каких-либо сосудов для хранения рабочей жидкости, так как в качестве хладагента предложено использование заборной воды. Соответственно, снижаются габариты и вес системы охлаждения, что немаловажно в условиях водного транспорта. Внедрение предложенной системы активного охлаждения позволит избежать снижения выработки в условиях высоких температур окружающей среды (порядка 20 %), поможет избежать перегрева, снизит деградацию фотоэлектрических ячеек, увеличит срок службы солнечных модулей.

Подобраны современные и надёжные компоненты: солнечные панели НТЦ ТПТ (68 шт.), контроллеры Helios Venus (4 шт.), аккумуляторы Tesla 4680 (22 шт.). В результате удалось повысить мощность солнечной электростанции с 10590 до 11740 Вт.

Проведен расчёт выработки электроэнергии солнечной электростанции с применением специализированной программы «RealSolar». Суммарная годовая выработка электроэнергии разработанной солнечной электростанции в условиях Астраханской области составит 20466, 13 кВт·ч.

Показано, что выработка электроэнергии за счет солнечных модулей полностью перекрывает затраты энергии на электропривод катамарана в период с мая по август, что вполне приемлемо для прогулочного судна и для проведения натуральных научных исследований.

С помощью программы Polysun удалось вычислить, что предлагаемый проект солнечной электростанции катамарана позволит сократить выбросы CO₂ в атмосферу на 7171,5 кг в год. Постепенный переход к возобновляемым источникам на водном транспорте позволит улучшить экологическое состояние в регионе.

Библиографический список

1. Бутузов, В. А. Российская возобновляемая энергетика / В. А. Бутузов, П. П. Безруких, В. В. Елистратов // Энергетик. – 2021. – № 9. – С. 25–32.
2. Курьлев, С. А. Основы применения солнечных электростанций в составе судовых энергетических установок / С. А. Курьлев, Р. А. Зайнутдинов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2017. – № 1. – С. 595–600.
3. Курьлев, А. С. Технологическое развитие энергоэффективных судов с альтернативными источниками энергии / А. С. Курьлев, Р. А. Зайнутдинов, С. А. Курьлев // Промышленная энергетика. – 2019. – № 7. – С. 54–60.
4. Yogesh S., Bijjargi. Cooling techniques for photovoltaic module for improving its conversion efficiency: A review / Yogesh S. Bijjargi, S. S. Kale and K. A. Shaikh // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – July – August 2016. – Vol. 7, issue 4. – P. 22–28.

5. Кирпичникова, И. М. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды / И. М. Кирпичникова, И. Б. Махсумов // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 56–74.
6. Hikmet, Esen. Cooled and uncooled photovoltaic panels modeling by using genetic expression programming / Hikmet Esen, Abdullah Kapıcıoğlu, Onur Ozsolak // International Journal of Innovative Engineering Applications. – 2017. – Vol. 1, no. 1. – P. 13–22.
7. Кирпичникова, И. М. Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях / И. М. Кирпичникова // Энергоэффективность. Ценология. Экология и энергобезопасность : материалы научной конференции / под науч. ред. Л. Х. Зайнутдиновой, М. Г. Тягунова. – 2020. – С. 46–55.
8. Шохзода, Б. Т. Тепловые характеристики гибридной солнечной установки / Б. Т. Шохзода, М. Г. Тягунов // Альтернативная энергетика в регионах России : материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018» (г. Астрахань, 5–7 декабря 2018 г.) / под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. Л. Х. Зайнутдиновой и д-ра техн. наук, проф. М. Г. Тягунова. – Астрахань : Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2018. – С. 295–299.
9. Шохзода, Б. Т. Оценка влияния рабочей температуры поверхности солнечного модуля с голографическим концентратором на эффективность его работы / Б. Т. Шохзода, М. Г. Тягунов // Вестник МЭИ. – 2019. – № 4. – С. 50–59.
10. Теруков, Е. И. Экспериментальное исследование влияния метеорологических факторов на выработку электроэнергии солнечными модулями в климатических условиях Астраханской области / Е. И. Теруков, Д. А. Андроников, Д. А. Малевский, Р. А. Зайнутдинов, А. Ю. Ключарев, С. Н. Братышев, В. Г. Ильичев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – № 2 (46). – С. 180–193.
11. Rustem, Zaynutdinov. Performance Evaluation of On-Grid Solar Power Stations in a Office Building in the Climatic Conditions of Astrakhan Region / Rustem Zaynutdinov, Larisa Zaynutdinova, Vladimir Ilyichev // Proceedings ICOECS 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – 2019. – P. 535–538. – ISBN: 978-1-7281-1728-7.
12. Larisa, Zaynutdinova. Experimental study into degradation of a single-crystal silicon photovoltaic module in the climatic conditions of Astrakhan region / Larisa Zaynutdinova, Rustem Zaynutdinov, Vladimir Ilyichev, Ilya Shurshev // Proceedings ICOECS 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – 2020. – P. 111–114. – ISBN: 978-1-7281-9115-7.
13. Кирпичникова, И. М. Повышение энергетической эффективности работы солнечных модулей за счет снижения температуры поверхности / И. М. Кирпичникова, И. Махсумов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 489–499.
14. Adnan, Ahmed Siddique. Effects of Surface Temperature Variations on Output Power of Three Commercial Photovoltaic Modules / Adnan Ahmed Siddique, Akram Mohiuddin Syed Mohammed Nahri // International Journal of Engineering Research. – 2016. – Vol. 5, № 11.
15. Ali M., Rasham. Experimental and Numerical Investigation of Photo-Voltaic Module Performance via Continuous and Intermittent Water Cooling Techniques / Ali M. Rasham, Hussein K. Jobair, Akram A. Abood Alkazzar // International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET). – 2015. – № 6 (7). – P. 87–98.
16. Patil, M. Experimental Investigation of Enhancing the Energy Conversion Efficiency of Solar PV Cell by Water Cooling Mechanism / M. Patil, A. Sidramappa, R. Angadi // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 376. – P. 14.
17. Krauter, S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels / S. Krauter // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2004. – Vol. 82, № 1–2. – P. 131–137.
18. Mehrotra, S. Performance of a solar panel with water immersion cooling technique / S. Mehrotra, P. Rawat, M. Debbarma, K. Sudhakar, // International Journal of Science, Environment and Technology. – 2014. – Vol. 3, № 3. – P. 1161–1172. – ISSN 2278-3687 (O).
19. Irwan Y. Indoor Test Performance of PV Panel through Water Cooling Method / Y. Irwan et al. // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 79. – P. 604–611.
20. Teo, H. G. An active cooling system for photovoltaic modules / H. G. Teo, P. S. Lee et al. // Applied Energy. – 2012. – Vol. 90. – P. 309–315.
21. Y. S. Bijjargi, Kale S.S, Shaikh K.A, Cooling techniques for photovoltaic module for improving its conversion efficiency: a review. / Y. S. Bijjargi, S. S. Kale, K. A. Shaikh. – July–August 2016. – Vol. 7, issue 4. – P. 22–28.

References

1. Butuzov, V. A., Bezrukih, P. P., Elistratov, V. V. Rossiyskaya vozobnovlyаемая энергетика [Russian renewable energy]. *Energetik* [Power engineering specialist], 2021, no. 9, pp. 25–32.
2. Kurylev, S. A. Zaynutdinov, R. A. Osnovy primeneniya solnechnykh elektrostantsiy v sostave sudovykh energeticheskikh ustanovok [Fundamentals of using solar power plants as part of marine power plants]. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii* [Innovative, information and communication technologies], 2017, no. 1, pp. 595–600.
3. Kurylev, S. A., Zaynutdinov, R. A., Kurylev, S. A. Tekhnologicheskoe razvitie energoeffektivnykh sudov s alternativnymi istochnikami energii [Technological development of energy-efficient vessels with alternative energy sources]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energetics], 2019, no. 7, pp. 54–60.
4. Yogesh S., Bijjargi, Kale, S. S. and Shaikh, K. A. Cooling techniques for photovoltaic module for improving its conversion efficiency: A review. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 2016, vol. 7, issue 4, pp. 22–28.
5. Kirpichnikova, I. M. Postroenie energeticheskikh kharakteristik solnechnykh moduley s uchetom usloviy okruzhayushchey sredy [Construction of energy characteristics of solar modules taking into account environmental conditions]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of Perm State Technical University. Electrical engineering, information technology and control systems], 2020, no. 34, pp. 56–74.
6. Esen, H., Kapıcıoğlu, A., Ozsolak, O. Cooled and uncooled photovoltaic panels modeling by using genetic expression programming. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 2017, no. 1, pp. 13–22.
7. Kirpichnikova, I. M. Osobennosti ekspluatatsii solnechnykh energoustanovok v razlichnykh klimaticheskikh usloviyakh [Features of solar power plants operation in various climatic conditions]. *Energoeffektivnost. Tsenologiya. Ekologiya*

i energobezопасnost : materialy nauchnoy konferentsii [Energy efficiency. Cenology. Ecology and Energy Security : materials of the scientific conference], 2020, pp. 46–55.

8. Shohzoda, B. T., Tyagunov, M. G. Teplovye kharakteristiki gibridnoy solnechnoy ustanovki [Thermal characteristics of a hybrid solar installation]. *Alternativnaya energetika v regionakh Rossii : materialy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «AER-2018»* [Alternative energy in the regions of Russia : materials of the youth scientific conference "AER-2018"], 2018, pp. 295–299.

9. Shohzoda, B. T., Tyagunov, M. G. Otsenka vliyaniya rabochey temperatury poverkhnosti solnechnogo modulya s golograficheskimi kontsentratormi na effektivnost ego raboty [Evaluating the effect of the operating temperature of the solar module surface with a holographic concentrator on its efficiency]. *Vestnik MEI* [Bulletin of MEI], 2019, no. 4, pp. 50–59.

10. Terukov, E. I., Andronikov, D. A., Malevskiy, D. A., Zaynutdinov, R. A., Klyucharev, A. Yu., Bratyshev, S. N., Ilichev, V. G. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya meteorologicheskikh faktorov na vyrabotku elektroenergii solnechnymi moduliyami v klimaticheskikh usloviyakh Astrakhanskoj oblasti [Experimental study of the influence of meteorological factors on the generation of electricity by solar modules in the climatic conditions of the Astrakhan region]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2019, no. 2 (46), pp. 180–193.

11. Zaynutdinov, R., Zaynutdinova, L., Ilyichev, V. Performance Evaluation of On-Grid Solar Power Stations in an Office Building in the Climatic Conditions of Astrakhan Region. *Proceedings ICOECS 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2019, pp. 535–538.

12. Zaynutdinova, L., Zaynutdinov, R., Ilyichev, V., Shurshev, I. Experimental study into degradation of a single-crystal silicon photovoltaic module in the climatic conditions of Astrakhan region. *Proceedings ICOECS 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2020, pp. 111–114.

13. Kirpichnikova, I. M. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti raboty solnechnykh moduley za schet snizheniya temperatury poverkhnosti [Increasing the energy efficiency of solar modules by reducing the surface temperature]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2020, vol. 2, pp. 489–499.

14. Siddique, A. A., Nahri, A. M. S. M. Effects of Surface Temperature Variations on Output Power of Three Commercial Photovoltaic Modules. *International Journal of Engineering Research*, 2016, vol. 5, no. 11.

15. Rasham, A. M., Jobair, H. K., Alkhazzar, A. A. A. Experimental and Numerical Investigation of Photo-Voltaic Module Performance via Continuous and Intermittent Water Cooling Techniques. *International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET)*, 2015, no. 6 (7), pp. 87–98.

16. Patil, M., Sidramappa, A., Angadi, R. Experimental Investigation of Enhancing the Energy Conversion Efficiency of Solar PV Cell by Water Cooling Mechanism. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 376, p. 14.

17. Krauter, S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2004, vol. 82, no. 1–2, pp. 131–137.

18. Mehrotra, S., Rawat, P., Debbarma, M., Sudhakar, K. Performance of a solar panel with water immersion cooling technique. *International Journal of Science, Environment*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 1161–1172.

19. Irwan, Y. et al. Indoor Test Performance of PV Panel through Water Cooling Method. *Energy Procedia*, 2015, vol. 79, pp. 604–611.

20. Teo, H. G., Lee, P. S. et al. An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 2012, vol. 90, pp. 309–315.

21. Bijjargi, Y. S., Kale, S. S., Shaikh, K. A. *Cooling techniques for photovoltaic module for improving its conversion efficiency: a review*, 2016, vol. 7, issue 4, pp. 22–28.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DOI 10.54398/20741707_2022_2_141
УДК 004.8

АНАЛИЗ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ВИБРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Статья поступила в редакцию 29.04.2022, в окончательном варианте – 13.05.2022.

Саксонов Евгений Александрович, Московский технический университет связи и информатики, 111024, Российская Федерация, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а,
доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-2015-6956, e-mail: saksmiem@mail.ru

Симонов Сергей Евгеньевич, Московский технический университет связи и информатики, 111024, Российская Федерация, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а,
аспирант, ORCID: 0000-0003-3391-8064, e-mail: s.e.simonov@mtuci.ru

Городничев Михаил Геннадьевич, Московский технический университет связи и информатики, 111024, Российская Федерация, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а,
кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-1739-9831, e-mail: m.g.gorodnichev@mtuci.ru

Мосева Марина Сергеевна, Московский технический университет связи и информатики, 111024, Российская Федерация, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а,
аспирант, ORCID: 0000-0002-9778-124X, e-mail: m.s.moseva@mtuci.ru

Синхронные двигатели с постоянными магнитами становятся все более популярными как в промышленности, так и в электрических и гибридных приводах транспортных средств. К сожалению, данные двигатели, так же как и другие типы двигателей, склонны к износу. В них, как и в приводных системах с асинхронными двигателями, подшипники качения часто выходят из строя. В этой статье рассматриваются возможности обнаружения данного типа механического повреждения путем анализа механических колебаний с использованием нейронных сетей. Для выделения диагностических признаков использовали быстрое преобразование Фурье и преобразование Гильберта (ПГ). Для автоматизации процесса обнаружения неисправностей были протестированы три типа нейронных сетей: много-слойный перцептрон (MLP), нейронная сеть с радиальной базовой функцией (RBF) и карта Кохонена (самоорганизующаяся карта, SOM). Входными сигналами этих сетей служили амплитуды гармонических составляющих, характерных для повреждений опорных элементов, полученные в результате быстрого преобразования Фурье или ПГ-анализа сигнала виброускорения. Эффективность анализируемых структур нейронных сетей сравнивалась с точки зрения влияния архитектуры сети и различных параметров процесса обучения на эффективность обнаружения.

Ключевые слова: синхронные двигатели с постоянными магнитами, вибродиагностика, нейронные сети, предиктивная аналитика

FAULT ANALYSIS OF SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS BASED ON VIBRATION MONITORING USING NEURAL NETWORKS

The article was received by the editorial board on 29.04.2022, in the final version – 13.05.2022.

Saksonov Evgeniy A., Moscow Technical University of Communication and Informatics, 8a Aviamotornaya St., Moscow, 111024, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-2015-6956, e-mail: saksmiem@mail.ru

Simonov Sergey E., Moscow Technical University of Communication and Informatics, 8a Aviamotornaya St., Moscow, 111024, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0000-0003-3391-8064, e-mail: s.e.simonov@mtuci.ru

Gorodnichev Mikhail G., Moscow Technical University of Communication and Informatics, 8a Aviamotornaya St., Moscow, 111024, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0000-0003-1739-9831, e-mail: m.g.gorodnichev@mtuci.ru

Moseva Marina S., Moscow Technical University of Communication and Informatics, 8a Aviamotornaya St., Moscow, 111024, Russian Federation,

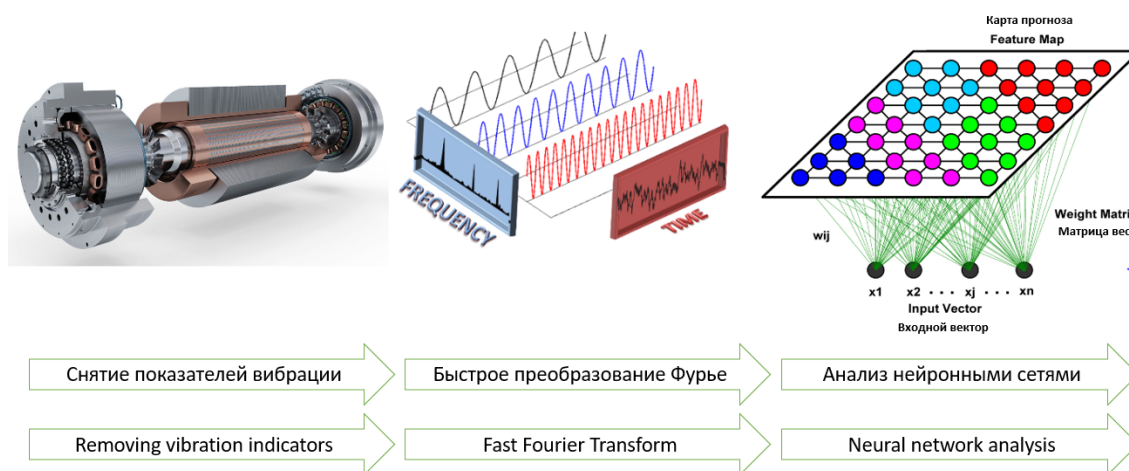
postgraduate student, ORCID: 0000-0002-9778-124X, e-mail: m.s.moseva@mtuci.ru

Permanent magnet synchronous motors are becoming increasingly popular both in industry and in electric and hybrid vehicle drives. Unfortunately, these engines, like other types of engines, are prone to wear. In them, as in drive systems with asynchronous motors, rolling bearings often fail. This article discusses the possibilities of detecting this type of mechanical damage by analyzing mechanical vibrations using neural networks. The fast Fourier transform and the Hilbert transform (TG)

were used to highlight diagnostic features. To automate the fault detection process, three types of neural networks were tested: Multilayer Perceptron (MLP), Radial Basis Function (RBF) Neural Network, and Kohonen Map (Self Organizing Map, SOM). The input signals of these networks were the amplitudes of the harmonic components characteristic of damage to the supporting elements, obtained as a result of the fast Fourier transform or PG analysis of the vibration acceleration signal. The efficiency of the analyzed structures of neural networks was compared in terms of the influence of the network architecture and various parameters of the learning process on the detection efficiency.

Keywords: permanent magnet synchronous motors, vibration diagnostics, neural networks, predictive analytics

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. В настоящее время синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) набирают все большую популярность на промышленных предприятиях. Они также широко используются в приводных системах электрических и гибридных транспортных средств. Это связано с их многочисленными преимуществами, такими как высокий КПД, возможность высокой перегрузки по крутящему моменту и высокое отношение мощности к весу. Они хорошо работают в областях, требующих как высокой точности, так и высокой динамики [1, 2]. Не менее важным требованием к современной приводной системе является показатель надежности. Несмотря на очень хорошие рабочие параметры, СДПМ являются не безотказными. Факторами, вызывающими различные повреждения, могут быть: слишком большой ток, высокая рабочая температура, неадекватная смазка или коррозия [2]. Внедрение диагностики приводной системы позволяет обнаруживать повреждения компонентов двигателя уже на начальной стадии их развития. Обычно отказ одного из компонентов приводит к последующим отказам. Мониторинг позволяет планировать замену поврежденной детали и предотвратить выход из строя связанных компонентов. Надлежащая диагностика гарантирует безопасность и продлевает срок службы электромашин [3]. Подшипники качения, рассматриваемые в данной статье, являются наиболее повреждаемыми компонентами двигателей переменного тока средней мощности. На их долю приходится около 40 % всех отказов электрических машин, а на отказы статора, ротора и других – 36 %, 9 % и 14 % соответственно [4]. Подшипники качения отвечают за поддержание постоянного воздушного зазора между ротором и статором. Поэтому их выход из строя постепенно приводит к выходу из строя всей электромашин [3, 4].

Существует множество методов диагностики подшипников двигателей переменного тока. При обнаружении данного вида повреждений в качестве диагностического сигнала чаще всего используют показатели датчиков вибрации [5]. Другими показателями, по которым можно прогнозировать отказы, являются ток [6], скорость [7], шум [8] и температура [9]. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) использовалось в [3] как один из методов, который можно использовать для предварительной обработки тока статора в диагностических целях. Метод требует, чтобы обрабатываемый сигнал был стационарным, чего трудно добиться в приводной системе с регулируемой скоростью. Поэтому в ссылках [3] и [10] для переходных состояний (при изменении момента нагрузки) использовалось вейвлет-преобразование. В работе [11] представлен менее часто используемый метод вариационной модовой декомпозиции (VMD), который позволяет выделить компоненты вибрационного сигнала, важные в процессе диагностики, от тех, которые мешают этому процессу. Преобразование Гильберта (HT) использовалось для повышения стабильности обнаружения методом VMD.

Чаще всего авторы сравнивают возможность обнаружения повреждений подшипников качения по нескольким диагностическим сигналам. Например, в работе [12] тестировались три диагностических сигнала: ток статора, скорость вращения ротора и механические вибрации. Симптомы неисправности в данной работе обнаруживались с использованием БПФ и анализа спектра эксцесса, данный метод улучшает отношение сигнал/шум. Испытания включали влияние различных значений частоты вращения и изменение момента нагрузки. Другой подход заключается в сравнительном анализе нескольких методов

обработки одного диагностического сигнала. В работе [13] авторы проанализировали сигнал виброускорения для обнаружения повреждения подшипников качения в приводе бесколлекторного двигателя постоянного тока. В представленном исследовании возможность обнаружения поврежденного подшипника оценивалась с помощью четырех методов обработки сигналов: классического БПФ-сигнала, преобразования Фурье по абсолютному значению сигнала, преобразования Фурье по огибающей сигнала, рассчитанной с помощью преобразования Гильберта, и преобразования Фурье от сигнала, отфильтрованного энергетическим оператором Тигера – Кайзера. Результаты были представлены для трех различных случаев отказа подшипников качения и сравнивались с неповрежденным подшипником. Авторы показали, что использование дополнительного метода обработки сигналов, основанного на преобразовании Гильберта, фильтре ТКЕО (Teager – Kaiser energy operator – энергетический оператор Тигера – Кайзера) или преобразовании по абсолютной величине, позволяет лучше контролировать состояние подшипника. Относительная амплитуда наблюдаемых характерных частот увеличилась в несколько десятков или сотен раз, а в случае ТКЕО – даже в несколько тысяч раз, что упростило распознавание неисправностей.

Поскольку механическая структура двигателей переменного тока (асинхронный двигатель, синхронный двигатель с постоянными магнитами, бесщеточные двигатели постоянного тока) различна, резонансы конструкции также различны. Таким образом, амплитуды одной и той же неисправности могут варьироваться в зависимости от приводной системы машины, и мы получим разные значения амплитуды при разных номерах гармоник, описывающих конкретный подшипник. При этом сама методика диагностики неисправностей будет одинаковой для подшипников качения для разных приводных систем [2, 5, 13, 14]. Основная задача проектировщика диагностической системы состоит в том, чтобы выбрать те гармоники, которые наиболее чувствительны к выбранным типам неисправностей для данной приводной системы.

Применение любого из вышеперечисленных методов обработки сигналов к механическим и/или электрическим сигналам, несущим признаки отказа подшипника, требует анализа и оценки полученных результатов. Необходимы экспертные знания для использования этих симптомов в диагностическом процессе, интерпретации результатов, установления подходящих порогов и проведения регулярного мониторинга данных, получаемых благодаря этим анализам. Такой подход вводит человеческий фактор, что снижает отказоустойчивость всей системы. Поэтому ведутся поиски методов устранения этого человеческого фактора и автоматизации процесса обнаружения неисправности. В настоящее время эту задачу могут выполнить нейронные сети (НС), которые могут выступать в качестве детекторов и/или классификаторов повреждений, сводя к минимуму участие человека в диагностическом процессе [1, 5, 14–23].

В последнее время в исследованиях по обнаружению повреждений подшипников качения в электроприводах переменного тока часто предлагаются глубокие нейронные сети (ГНС), которые набирают все большую популярность в связи с развитием методов глубокого обучения [1, 15, 16]. В работе [1] представлена диагностика подшипников качения привода СДПМ с помощью сверточной нейронной сети (СНС), основанной на измерениях тока статора и сигналов вибрации. Одновременный анализ частотного спектра тока статора и необработанного вибрационного сигнала позволил получить эффективность обнаружения на уровне 96 %. Диагностика только по одному измеренному сигналу привела к снижению эффективности в два раза. В работе [15] метод обучения без учителя на основе глубокого автоэнкодера использовался для классификации трех состояний двигателя СДПМ: неповрежденный, неисправность внешней обмотки подшипника и 10% межвитковое короткое замыкание. Непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) использовалось для начальной обработки сигналов тока статора и сигналов механической вибрации. Авторы получили точность классификации при одновременном использовании обоих сигналов на уровне примерно 91 % для сигналов без шума и примерно 88 % для сигналов с шумом. Классификатор, основанный только на текущем сигнале, достиг точности обнаружения примерно 99 % (сигнал без шума) и примерно 75 % для сигнала с шумом, а на основе механических вибраций – примерно 69 % и 66 % соответственно. Авторами [16] представлен классификатор трех состояний двигателя СДПМ: неповрежденное, неисправность по внешнему кольцу подшипника и 10%-ное межвитковое замыкание. В этом случае двигатель работал в условиях переменной скорости и переменного момента нагрузки. Были проанализированы ток статора и механические вибрации, и классификация была выполнена с помощью метода опорных векторов с радиальной базисной функцией Гаусса (RBF) в качестве ядра в методе опорных векторов (SVM). Полученная точность этого классификатора SVM составила примерно 93 %.

Растущий интерес ученых к глубоким нейронным сетям привел к значительно меньшему количеству статей, использующих классические неглубокие нейронные сети (НС) в диагностике привода СДПМ. Однако классические НС имеют ряд важных преимуществ, которые следует учитывать, таких как более простая архитектура, меньшее время обучения и, следовательно, меньшая вычислительная сложность, в том числе меньшие требования к мощности процессоров при практической реализации.

Следует подчеркнуть, что правильно параметризованная классическая нейронная сеть позволяет достичь очень высокого уровня эффективности диагностики электрических машин. Примером такой сети является многослойный перцептрон (MLP), использованный в работе [17], где авторы представляют использование сетей с одним скрытым слоем, обученных с помощью алгоритма дельта-правила, для обнаружения эксцентриситета и повреждения подшипников качения в СДПМ. В качестве диагностического

сигнала использовался ток статора. Эффективность была протестирована для переменных значений скорости и момента нагрузки. Проблема была обработана бинарным способом, поэтому ответ сети показывал только отказ (1) или нормальные (0) условия работы. Наилучшие результаты, 100% эффективность, были получены при самых высоких значениях нагрузки и скорости.

Карты самоорганизации (SOM), также известные как нейронная сеть Кохонена (KNN), тоже использовались в качестве классификаторов повреждений подшипников качения. Диагностика неисправности подшипника с помощью SOM была представлена, например, в ссылке [5]. В данной работе диагностика основывалась на измерении вибрации. Для начальной обработки сигнала использовались БПФ и вейвлет-преобразование. Задачей НС являлась классификация уровней неисправности. Исследование проводилось для пяти различных условий нагрузки, пяти различных скоростей вращения вала и восьми отказов подшипников. Предложенный SOM позволил обнаружить поврежденный подшипник с низкой топологической ошибкой около $\pm 0,04$, но с умеренной ошибкой квантования $\pm 0,5$.

Пример очень обширной классической НС можно найти в источнике [22]. Авторы разработали трехслойные MLP с 10, 15, 20, 25, 30 и 35 нейронами в скрытом слое соответственно. На входы этих НС помимо двух амплитуд характерных частот повреждения подаются амплитуда частоты вращения, коэффициент эксцесса вибросигнала, максимальное и среднее значения вибросигналов. Нейронная сеть имела три выхода, каждый из которых служил индикатором одной из трех неисправностей: разболтанность подшипника, дефекты внутренней дорожки качения и дефекты тел качения. На выходе получали информацию о техническом состоянии испытуемого элемента подшипника (поврежден или нет). Алгоритм Левенберга – Марквардта использовался для обучения, поддерживаемого методом перекрестной проверки, чтобы улучшить обобщение и избежать переобучения. Несмотря на относительно большее количество нейронов в скрытом слое, представленные детекторы характеризовались средней эффективностью, примерно 86–96 %.

Другой пример использования классических НС состоит в увеличении количества входов сети [23]. Авторы использовали данные измерений из Центра данных подшипников Университета Кейс Вестерн Резерв для обучения самоорганизующейся карты (SOM) с целью классификации повреждений подшипников качения. В качестве входных данных SOM использовались различия 70 признаков, таких как статистические признаки, признаки частотной области, коэффициенты авторегрессионной модели, анализ разложения пакетов вейвлетов и энергия энтропии разложения эмпирических мод. Для выбора оптимальных признаков использовались две методики (алгоритмы расширенного рельефа и алгоритм минимальной избыточности и максимальной релевантности (mRMR)), которые позволили получить до 100% эффективности по 33 признакам. Однако практическая реализация таких расширенных детекторов или классификаторов неисправностей достаточно сложна, особенно при необходимости использования простых процессоров, например, процессоров с архитектурой ARM, а также для применения таких решений в промышленности.

Хотя, как видно из вышеприведенного обзора литературы, имеются примеры использования избранных классических нейронных структур для диагностики подшипников качения в приводах с регулируемой частотой вращения СДПМ, отсутствует сравнение эффективности различных нейронных структур в выявлении и/или классификации отказов подшипников, проводимых для широкого диапазона условий работы такого привода.

Таким образом, целью настоящего исследования является сравнительный анализ эффективности трех выбранных типов ИНС для обнаружения повреждений подшипников качения в приводе СДПМ. Для получения диагностических признаков планируется использовать два метода обработки вибрационного сигнала: быстрое преобразование Фурье (БПФ) и преобразование Гильберта (ПГ) для получения огибающей сигнала, который затем подвергался анализу БПФ. Предварительный анализ позволит выделить несколько характеристик диагностических признаков выхода из строя подшипников качения. Необходимо сравнить возможности использования MLP-, RBF-сетей и карт Кохонена для выявления и классификации повреждений подшипников. Также необходимо проанализировать два варианта работы детектора НС: первый должен определять наличие повреждения или его отсутствие (детектор неисправности), второй должен определять тип поврежденного элемента конструкции подшипника (классификатор неисправности). Кроме того, необходимо проанализировать влияние топологии НС, функции активации, метода обучения и скорости обучения на эффективность обнаружения/классификации. Предполагалось, что разрабатываемые нейродетекторы и классификаторы должны достигать точности на уровне 95–100 %, но не менее 90 %.

Первая часть этой статьи содержит обзор литературы по диагностике подшипников качения с особым акцентом на приводы СДПМ, а также мотивацию представленного исследования. В следующих двух разделах обсуждаются характеристики повреждения подшипников качения и методы, используемые для анализа начального сигнала. В четвертом разделе кратко охарактеризованы применяемые структуры НС.

Краткая характеристика признаков неисправности подшипника. Подшипники качения являются элементами привода, обеспечивающими вращение ротора с минимальными механическими потерями. Подшипники позволяют минимизировать сопротивление движению вала и удерживать его в правильном положении. Поэтому подшипники являются элементами, наиболее интенсивно подверженными процессу изнашивания [3, 4]. Как правило, подшипники качения состоят из разделителя (сепаратора), в котором тела качения размещены и правильно разделены. Сепаратор расположен между внутренним кольцом, которое надевается на вал машины, и наружным кольцом [21]. Конструкция подшипника качения показана на рисунке 1.

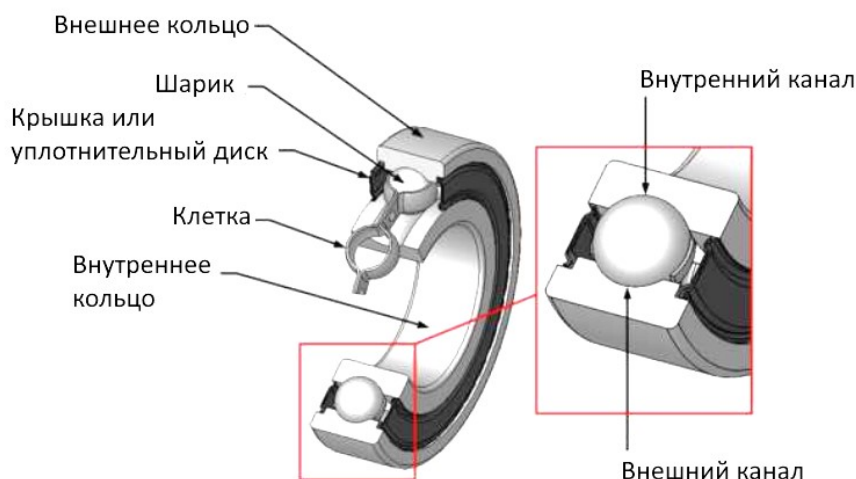


Рисунок 1 – Схема конструкции подшипника качения

По своему характеру повреждения подшипников качения можно разделить на два типа [24, 25]:

- точечные повреждения (выбоины, сколы от мелких осколков);
- диффузные повреждения (деформация поверхности, коррозионные повреждения, неровности).

Оба типа повреждений приводят к разным симптомам. Точечные повреждения вызывают вибрации в низкочастотном диапазоне. Диффузные повреждения обнаруживаются путем наблюдения за спектром вибрации в широком диапазоне. Из-за их природы их трудно описать с точки зрения конкретных частот. Возникновение повреждения и его дальнейшее усугубление вызывает изменение геометрии тел качения, повышение уровня вибрации и шума двигателя при работе и, наряду с их ухудшением, может привести к эксцентриситету ротора в отношении к статору и повреждению механического соединения с работающей машиной. Как и любой элемент электропривода, подшипники имеют длительный срок службы и их естественные повреждения возникают в результате характера и времени эксплуатации. Преждевременные отказы могут возникать по многим причинам. Чаще всего они возникают из-за неправильной сборки, нередко они также вызваны неправильным подбором присоединения к требованиям привода и его неправильной эксплуатацией [26–29]. В зависимости от того, какой именно элемент подшипника поврежден точно, в спектре сигнала механической вибрации проявляются различные признаки повреждения [13, 21, 24, 25].

Признаки, определяющие состояние подшипника, получают путем определения амплитуд характерных частот, встречающихся в спектре вибрации. Значительное увеличение этих амплитуд свидетельствует о точечном повреждении данного элемента. Для расчета характеристических частот необходимо найти частоту вращения вала двигателя f_r :

$$f_r = \frac{n}{60}, \quad (1)$$

где n – скорость двигателя (об/мин).

Тогда частоты характерных гармоник при отказах отдельных элементов подшипника можно определить на основании приведенных ниже формул [21, 22, 24]:

$$f_{bc} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos\beta \right), \quad (2)$$

$$f_{or} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos\beta \right), \quad (3)$$

$$f_{ir} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos\beta \right), \quad (4)$$

$$f_{re} = \frac{D_c}{D_b} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos\beta \right), \quad (5)$$

где N_b – количество тел качения (шариков); D_b – диаметр тел качения; D_c – делительный диаметр подшипника; β – рабочий угол подшипника (0° для подшипника качения); f_{bc} , f_{or} , f_{ir} , f_{re} – частоты, характерные для данного отказа: сепаратор подшипника, внешнее кольцо, внутреннее кольцо и тело качения.

Хорошо видно, что частоты характеристических гармоник зависят только от частоты вала (которая в двигателе с постоянным магнитом не зависит от момента нагрузки, в отличие от асинхронного двигателя) и геометрии подшипника качения.

Методы анализа признаков отказа с использованием вибросигнала. В данной работе для подготовки входных сигналов разрабатываемых нейродетекторов использовались два метода анализа вибросигнала: классическое быстрое преобразование Фурье (БПФ) и БПФ сигнала огибающей виброускорения, рассчитанного с помощью преобразования Гильберта (ЭНВ).

Классическое БПФ – это преобразование, наиболее часто используемое в диагностике машин. Он преобразует сигнал из временной области в частотную область и в непрерывном виде может быть записан следующим образом [30]:

$$F(j, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (6)$$

Преобразование Фурье предполагает, что анализируемые сигналы являются периодическими и стационарными, и выполняет декодирование анализируемого сигнала в заданное количество синусоидальных сигналов с заданной частотой составляющих. Реальные сигналы в большинстве случаев не удовлетворяют условиям периодичности и стационарности. Кроме того, сигнал должен дискретизироваться синхронно с основной частотой сигнала в соответствии с теоремой выборки Шеннона. Длина анализируемого фрагмента сигнала должна быть целым числом, кратным периоду его основной гармоники. Для сигналов, отвечающих этим критериям, полученный спектр правильный; в противном случае происходит размытие спектра. Это также связано с неточностью определения амплитуды и может оказывать существенное влияние на интерпретацию результатов. Переход из временной области в частотную означает, что момент появления данной компоненты не влияет на ее место в спектре. Следовательно, сигнал, подвергаемый такому анализу, должен быть стационарным из-за потери временной информации.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) используется для анализа сигналов [30]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}, \quad (7)$$

где $x(n)$ – реальные дискретные сигналы конечной длины N , генерируемые при непрерывной дискретизации сигналов.

Основная форма, используемая для представления результатов после дискретного преобразования Фурье (ДПФ), представляет собой частотный спектр с амплитудами гармоник, рассчитанными согласно:

$$|X(k)| = \sqrt{(\text{Re}\{X(k)\})^2 + (\text{Im}\{X(k)\})^2}. \quad (8)$$

В целях масштабирования спектра в единицах частоты каждый $|X(k)|$ выборке приписывается частота $f(k)$, рассчитанная по следующему выражению:

$$f(k) = k \frac{f_p}{N}, \quad (9)$$

где f_p – частота дискретизации сигнала, а N – количество всех выборок сигнала.

Преобразование Гильберта. Непрерывное преобразование Гильберта для любого хода времени $x(t)$ имеет следующий вид [31]:

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau. \quad (10)$$

Аналитический сигнал $\alpha(t)$, созданный из реального сигнала $x(t)$ и его преобразования Гильберта, имеет следующий вид [31]:

$$\alpha(t) = x(t) + jH[x(t)] = a_{ENV}(t)e^{j\varphi(t)}, \quad (11)$$

где $a_{ENV}(t)$ – мгновенная амплитуда огибающей исходного сигнала $x(t)$, $j(t)$ – мгновенная фаза [31, 32].

Анализ сигнала $\alpha_{ENV}(t)$ позволяет найти частоты, характерные для отказов в среднечастотном диапазоне спектра. Для нахождения характерных частот в низкочастотном диапазоне требуется высокое частотное разрешение. Для получения высокого частотного разрешения необходима стационарная работа машины, которую трудно поддерживать в реальных условиях. Характерной особенностью применения преобразования Гильберта является устойчивость к обнаружению вибраций, возникающих из-за других источников, помимо повреждения подшипника. Получается сигнал, из которого также исключается собственная частота диагностируемого двигателя. Это существенное преимущество данной трансформации. ПГ улучшает процесс выделения симптомов и, следовательно, эффективность диагностической системы даже в случае значительных нарушений измеряемого сигнала [31].

Для данного исследования отказов подшипников рассмотрим различные структуры неглубоких нейронных сетей и для последующего сравнения – их эффективность в обнаружении и классификации проанализированных отказов. Рассмотрим следующие неглубокие НС: многослойные перцептроны (MLP), сети с радиальными базовыми функциями (RBF) и самоорганизующиеся карты Кохонена (self-organizing maps, SOM).

Многослойные перцептроны (MLP – Multilayer Perceptrons). MLP с прямой связью наиболее популярны в различных промышленных приложениях, они состоят из входного слоя, одного или нескольких скрытых слоев и выходного слоя. Каждый нейрон в каждом слое связан с нейроном следующего слоя; между нейронами одного слоя нет связей, и данные обрабатываются параллельно. Этот тип НС выполняет глобальную аппроксимацию [33, 34]. Это означает, что многие нейроны одновременно решают отобразить каждый элемент входного вектора.

В общем случае сеть MLP можно описать следующим образом:

$$y_k = f_2(\sum_{i=1}^M \omega_{ki}^2 \times f_1(\sum_{j=1}^N \omega_{ij}^{(1)} \times x_j + \omega_0^{(1)}) + \omega_0^{(2)}), \quad (12)$$

где y_k – k -е – выход из сети; x_j – j -е – вход в сеть; $\omega_{ij}^{(1)}$, ω_{ki}^2 – веса первого и второго скрытых слоев соответственно; $\omega_0^{(1)}$, $\omega_0^{(2)}$ – смещения в первом и втором скрытых слоях соответственно.

Процесс обучения сети MLP состоит из модификации весов таким образом, чтобы минимизировать целевую функцию, обычно среднеквадратичную ошибку выходного значения по отношению к ожидаемому значению. В этой работе для обучения сетей MLP использовался алгоритм Левенберга – Марквардта (LM) [35, 36], который сочетает в себе итерационные особенности метода оптимизации алгоритма Гаусса – Ньютона и алгоритма наискорейшего спуска. Благодаря этому мы получили инструмент, который работает как градиентный спуск, когда мы находимся далеко от минимума целевой функции, а затем сводится к методу сопряженных градиентов. Общая форма алгоритма обучения LM описывается уравнением (13) [35, 37, 38]:

$$\omega_{n+1} = \omega_n - \eta(J_n^T J_n + \mu I)^{-1} J_n^T e_n, \quad (13)$$

где ω_n – вес сети; μ – коэффициент регуляризации, определяющий работу алгоритма; J_n – матрица Якоби, e_n – ошибка объединения; η – скорость обучения.

Отличие формул Ньютона состоит в добавлении единичной матрицы, умноженной на коэффициент регуляризации μ . Он всегда имеет положительное значение, изменяющееся в процессе обучения. Изменяя этот коэффициент, мы непрерывно переходим от метода алгоритма наискорейшего спуска к методу развёртывания Ньютона. Для значений, близких к нулю, алгоритм вычисляет веса аналогично методу развёртывания Ньютона. Увеличение значения μ сопровождается увеличением значимости направления улучшения, определяемого на основе градиента функции ошибок. Помимо определения доли отдельных стратегий в получаемом результате, μ также выполняет функцию величины шага в сторону улучшения [35, 37, 38].

Алгоритм Левенберга – Марквардта очень чувствителен к инициализации весовых значений, поскольку они выбираются случайным образом. Улучшение вышеописанного метода заключается в добавлении байесовской регуляризации. Это улучшает обобщающие свойства сети. Регуляризация вносит изменение в целевую функцию. Цель состоит не только в минимизации среднеквадратичной ошибки, но и в достижении ее с наименьшими возможными весами. Целевая функция принимает следующий вид [39, 40]:

$$C = \beta E + \alpha E_\omega, \quad (14)$$

где E – сумма среднеквадратичных ошибок; E_ω – сумма квадратов весов; β – фактор обучения; α – скорость отказа.

Фактор α обеспечивает низкие значения веса, что значительно снижает склонность сети к переобучению. Эта модификация также обеспечивает большую устойчивость к шуму и некорректным входным данным, но занимает больше времени [39, 40].

Сети с радиальным основанием. Рассмотрим радиальные сети (радиальные базисные функции, RBF), т.е. нейронные сети прямого распространения с одним скрытым слоем, в котором функции активации являются радиальными. Каждый элемент входного вектора отображается определенным радиальным нейроном скрытого слоя. Нейроны выходного слоя являются линейными и отвечают за суммирование выходов отдельных нейронов скрытого слоя. Структура сети RBF показана на рисунке 2.

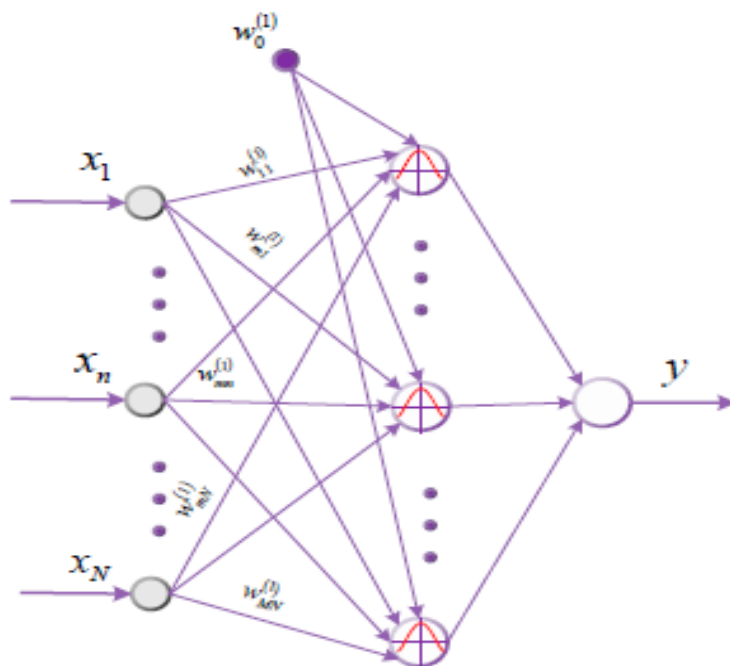


Рисунок 2 – Общая структура сети с радиальной базисной функцией (RBF)

В отличие от сетей MLP, нейроны которых выполняют задачу глобальной стохастической аппроксимации функций многих переменных, в сетях RBF отображение полного набора входных данных представляет собой сумму локальных отображений [34]. Выходные значения RBF-сети получаются как сумма произведений выходов зубчатых RBF-нейронов и весовых коэффициентов:

$$y_k = \sum_{j=1}^N \omega_{jk} \varphi_j + \omega_{k0} \quad (15)$$

с вычисленными выходами нейронов RBF, полученными следующим образом:

$$\varphi_j = \exp\left(-\frac{v_j^2(X)}{2\sigma_j^2}\right), \quad (16)$$

где y_k – k -й выход зубчатой сети; ω_{jk} – весовой коэффициент между σ -м выходом скрытого (RBF) слоя и k -м нейроном выхода НС; ω_{k0} – смещение k -го выходного нейрона; $v_j^2(X)$ – значения входного вектора евклидова расстояния и центры функций RBF; σ – коэффициент разброса функции активации.

Рассчитываются евклидовы расстояния между значениями входного вектора и центрами функций РБФ:

$$v_j(X) = \|X - C_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_k - c_k)^2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (17)$$

где $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]^T$ – входной вектор; C_j – вектор, относящийся к центру каждого нейрона RBF.

Процесс проектирования для сетей RBF намного проще, чем для MLP. Процедура обучения состоит из трех этапов, которые включают [41]:

- выбор центров C_j скрытых радиальных базисных нейронов;
- выбор параметра разброса, σ – ширина радиальной функции для каждого скрытого нейрона;
- определение весовых коэффициентов ω_{jk} между скрытым (радиальным) и выходным слоями.

Первый этап может выполняться случайным образом с равномерным распределением. Для более сложных задач используются алгоритмы кластеризации данных. Наиболее популярен алгоритм k -средних [41]. Этот алгоритм требует определения числа кластеров сверху вниз. В общем, алгоритм k -средних направлен на размещение центров нейронов RBF в областях с наиболее значимыми данными [42, 43]. Веса нанесенного слоя определяются методом обучения с учителем, например, по дельта-правилу. Скорость обучения намного короче, поэтому проблема локального минимума снимается.

Карты Кохонена. Последними структурами нейронной сети, рассматриваемыми в данной работе для обнаружения повреждений подшипников качения, являются самоорганизующиеся карты (СОМ). Сетевое обучение основано на встроенном механизме конкуренции и оценки соседства. SOM образован входным и выходным (конкурентным) слоями. Конструкция менее сложна, чем сети MLP и RBF из-за отсутствия скрытого слоя.

Данная НС также является сетью с прямой связью, и каждый элемент входного слоя связан с каждым элементом выходного слоя. Выходной сигнал y_k k -го нейрона описывается векторной зависимостью:

$$y_k = W^T X = \|W\| \|X\| \cos \phi_k.$$

Поскольку три входных вектора X и веса W нормированы в сети, выходное значение y_k (активация нейрона) определяется угловой разницей ϕ_k между векторами X и W .

Самоорганизующиеся сети позволяют находить неизвестные связи между входными данными, что возможно с использованием двух методов обучения: «Победитель получает все» (WTA) и «Победитель получает больше всего» (WTM). В методе WTA адаптируется только нейрон-победитель. Адаптация заключается в приближении нейрона-победителя к входному паттерну. Алгоритм WTM предполагает, что также могут быть активированы нейроны из должным образом заданного соседства (например, функция соседства Гаусса) (адаптация веса). Обычно в качестве меры окрестности берется евклидово расстояние [44–46].

Испытание ИНС. Для проведения сравнительного анализа эффективности выбранных ИНС с целью выявления и прогнозирования повреждения подшипников качения в СДПМ необходимо промоделировать поведение измерений показателей вибрации, температуры и электрических параметров СДПМ.

Похожая работа по сравнительному анализу представленных нейросетей была проделана в [50]. Согласно этой работе использовался испытательный стенд на основе двух моторов и частотного преобразователя. На данном испытательном стенде были использованы исходные данные измерений, полученные в разработанной авторами лабораторной установке, работающей на основе частотного преобразователя, находящегося в режиме векторного управления, так как это обычно происходит в реальных промышленных условиях. Авторы отказались от использования общедоступных баз данных, анализ которых был представлен в многочисленных статьях. Измерения проводились с использованием измерительной карты и компьютера. Измерения вибрации проводились для подшипников с моделируемыми повреждениями внешних и внутренних дорожек качения и тел качения, а также для подшипников без дефектов с использованием акселерометров. Кроме того, испытуемые подшипники были повреждены искровым скачком к выбранному элементу (электрический разряд между электродом и поврежденным элементом), аналогичным [1, 8, 13, 31]. В литературе отказы подшипников часто представлены срезом дорожки качения или отверстием, выполненным в поврежденной дорожке качения [7, 13, 17, 18, 23, 25]. В данной статье в качестве диагностического сигнала было использовано виброускорение, измеренное по трем осям. На основании анализа результатов измерений было установлено, что наибольшая реакция на повреждение подшипника была видна

в сигнале по оси X, поэтому только этот сигнал использовался для дальнейшего анализа. Измерения проводились в трех сериях с переменной частотой питающего напряжения и переменным моментом нагрузки. Две серии были использованы для изучения ИНС, а третья – для их тестирования.

Использование преобразования Фурье позволило определить амплитуды характерных частот отказов с помощью приложения, разработанного в симуляционной среде. Проанализированы амплитуды 32 гармоник с частотами, связанными с повреждением внутреннего кольца, внешнего кольца и элемента качения.

Амплитуды 32 гармоник с частотами, связанными с повреждением внутреннего кольца, внешнего кольца и элемента качения, были проанализированы с точки зрения их чувствительности к конкретному повреждению подшипника. Детальный анализ позволил выделить симптомы, которые наиболее сильно реагировали на выбранный тип поврежденного конструктивного элемента подшипника. Было проверено, как влияет момент нагрузки и частота питающего напряжения на выбранные симптомы. Для учета изменчивости момента нагрузки частота вращения f_r была выбрана в качестве вспомогательного параметра. Если этого не сделать, то тестируемые структуры были бы очень сложными. Кроме того, они потребовали бы большого количества нейронов в скрытых слоях. На этой основе был выбран первый 7-элементный входной вектор ИНС, состоящий из амплитуд характеристических гармоник с частотами отказа, для которых наблюдалось значительное увеличение значения при возникновении отказа. При этом выделенные гармоники характеризовались определенной закономерностью с увеличением частоты питания f_s или изменением значения момента нагрузки.

Второй входной вектор был разработан на основе ГП-анализа сигнала виброускорения и следующего БПФ полученной огибающей, рассчитанной по уравнению (12). После применения преобразования Гильберта сигнала произошло значительное увеличение амплитудных значений гармоник с частотами, характерными для отдельных отказов.

Заключение. Применение классических ИНС в диагностике подшипников качения синхронного двигателя с постоянными магнитами позволяет автоматизировать процесс диагностики неисправностей. Этот инструмент не требует ни математической модели, ни участия человека-эксперта в процессе диагностики, что является его существенными преимуществами.

В случае классификатора неисправностей достижение 100% эффективности требовало более сложной структуры. Одного скрытого слоя оказалось недостаточно для исследуемой проблемы. Наилучшие результаты были получены методом обучения Левенберга – Марквардта с байесовской регуляризацией и логарифмически-сигмоидной функцией активации. Классическая MLP-сеть обеспечила наилучшую эффективность и наименьшие отклонения от ожидаемого значения из всех исследованных структур, особенно для обучающих данных, полученных при анализе сигнала виброускорения с использованием преобразования Гильберта.

Сети с радиальными базисными функциями характеризуются повторяемостью откликов для структур с одинаковыми параметрами и одним и тем же входным вектором для каждого последующего процесса обучения. Это связано с тем, что начальные веса выбираются на основе входного вектора, а не случайным образом, как в MLP-сетях. По этой причине выбор параметров сети RBF занимает меньше времени.

Использование карт Кохонена не полностью автоматизирует процесс диагностики. В этом случае необходимо использовать оценку человека-оператора или добавить алгоритм, который будет отвечать за дополнительный анализ результата, полученного SOM. Тем не менее карты Кохонена кажутся наиболее интересными для дальнейшего исследования всех протестированных структур. Алгоритм k-means чаще всего используется для автоматизации процесса классификации результатов [48, 49]. Выходы сети Кохонена также могут быть входами для других сетей, что обеспечит полную автоматизацию процесса, как это предложено в статье [47]. Для таких целей исследования могут проводиться как с сетями MLP, так и с сетями RBF. Важным преимуществом использования карт Кохонена является отсутствие сложностей в выборе их параметров.

Отрасль нуждается в решениях, обеспечивающих эффективный и автоматизированный процесс диагностики. Предлагаемые ИНС могут быть легко реализованы с использованием малобюджетной интегрированной аппаратной платформы на базе, например, Arm Cortex-M или аналогичных процессоров, либо диагностика может быть основана на существующей в отрасли измерительной инфраструктуре и ее расширении дополнительными нейронными детекторами. Примерная концепция дешевой диагностической системы представлена в [14].

Библиографический список

1. Ullah, Z. Detection and Identification of Demagnetization and Bearing Faults in PMSM Using Transfer Learning-Based VGG / Z. Ullah, B. A. Lodhi, J. Hur // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – P. 3834.
2. Chen, Y. Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review / Y. Chen, S. Liang, W. Li, H. Liang, C. Wang // *Appl. Sci.* – 2019. – Vol. 9. – P. 2116.
3. Rosero, J. Fault Detection in dynamic conditions by means of Discrete Wavelet Decomposition for PMSM running under Bearing Damage / J. Rosero, L. Romeral, E. Rosero, J. Urresty // *Proceedings of the 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Washington, DC, USA, 15–19 February 2009*. – P. 951–956.

4. He, J. Diagnosis of stator winding short-circuit faults in an interior permanent magnet synchronous machine / J. He, C. Somogyi, A. Strandt, N. A. O. Demerdash // Proceedings of the 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, USA, 14–18 September 2014. – P. 3125–3130.
5. Nkuna, J. S. R. Vibration Condition Monitoring and Fault Classification of Rolling Element Bearings Utilising Kohonen's Self-organising Maps : Theses and Dissertations (Mechanical Engineering). Ph.D. Thesis. – Vanderbijlpark, South Africa : Vaal University of Technology, 2013.
6. Picot, A. Statistic-based spectral indicator for bearing fault detection in permanent-magnet synchronous machines using the stator current / A. Picot, Z. Obeid, J. Regnier, S. Poignant, O. Darnis, P. Maussion // Mech. Syst. Signal Process. – 2014. – Vol. 46. – P. 424–441.
7. Ye, M.; Huang, J. Bearing Fault Diagnosis under Time-Varying Speed and Load Conditions via Speed Sensorless Algorithm and Angular Resample / M. Ye, J. Huang // Proceedings of the 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 3–6 September 2018. – P. 1775–1781.
8. Lu, S.; He, Q.; Zhao, J. Bearing fault diagnosis of a permanent magnet synchronous motor via a fast and online order analysis method in an embedded system / S. Lu, Q. He, J. Zhao // Mech. Syst. Signal Process. – 2018. – Vol. 113. – P. 36–49.
9. Nembhard, A. D.; Sinha, J. K.; Pinkerton, A. J.; Elbhah, K. Fault diagnosis of rotating machines using vibration and bearing temperature measurements / A. D. Nembhard, J. K. Sinha, A. J. Pinkerton, K. Elbhah // Diagnostyka. – 2013. – Vol. 14. – P. 45–51.
10. Rosero, J. PMSM Bearing Fault Detection by means of Fourier and Wavelet transform / J. Rosero, J. Cusido, J. A. Ortega, L. Romeral, A. Garcia // Proceedings of the IECON 2007 – 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, Taiwan, 5–8 November 2007. – P. 1163–1168.
11. Liu, H. Fault Diagnosis for a Bearing Rolling Element Using Improved VMD and HT / H. Liu, D. Li, Y. Yuan, S. Zhang, H. Zhao, W. Deng // Appl. Sci. – 2019. – Vol. 9. – P. 1439.
12. Ren, B. Fault Diagnosis of Motor Bearing Based on Speed Signal Kurtosis Spectrum Analysis / B. Ren, M. Yang, N. Chai, Y. Li, D. Xu // Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 11–14 August 2019. – P. 1–6.
13. Skora, M. Selected Rolling Bearing Fault Diagnostic Methods in Wheel Embedded Permanent Magnet Brushless Direct Current Motors / M. Skora, P. Ewert, C. T. Kowalski // Energies. – 2019. – Vol. 12. – P. 4212.
14. Ewert, P. Low-Cost Monitoring and Diagnosis System for Rolling Bearing Faults of the Induction Motor Based on Neural Network Approach / P. Ewert, C. T. Kowalski, T. Orłowska-Kowalska // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – P. 1334.
15. Senanayaka, J. S. L. A robust method for detection and classification of permanent magnet synchronous motor faults: Deep autoencoders and data fusion approach / J. S. L. Senanayaka, V. K. Huynh, K. G. Robbersmyr // J. Phys. Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1037. – P. 032029.
16. Senanayaka, J. S. L. Fault detection and classification of permanent magnet synchronous motor in variable load and speed conditions using order tracking and machine learning / J. S. L. Senanayaka, V. K. Huynh, K. G. Robbersmyr // J. Phys. Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1037. – P. 032028.
17. Akar, M. Mechanical fault detection in permanent magnet synchronous motors using equal width discretization-based probability distribution and a neural network model / M. Akar, M. Hekim, U. Orhan // Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci. – 2015. – Vol. 23. – P. 813–823.
18. Pandarakone, S. E.; Mizuno, Y.; Nakamura, H. Distinct Fault Analysis of Induction Motor Bearing Using Frequency Spectrum Determination and Support Vector Machine / S. E. Pandarakone, Y. Mizuno, H. Nakamura // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2017. – Vol. 53. – P. 3049–3056.
19. Navasari, E. Detection Of Induction Motor Bearing Damage With Starting Current Analysis Using Wavelet Discrete Transform And Artificial Neural Network / E. Navasari, D. A. Asfani, M. Y. Negara // Proceedings of the 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Kuta, Indonesia, 24–26 July, 2018. – P. 316–319.
20. Hoang, D. T. A Motor Current Signal-Based Bearing Fault Diagnosis Using Deep Learning and Information Fusion / D. T. Hoang, H. J. Kang // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2020. – Vol. 69. – P. 3325–3333.
21. Zhou, J. Fault detection of rolling bearing based on FFT and classification / J. Zhou, Y. Qin, L. Kou, M. Yuwono, S. SU // J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf. – 2015. – Vol. 9.
22. Li, B. Neural-Network-Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis / B. Li, M.-Y. Chow, Y. Tipsuwan, J. C. Hung // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2000. – Vol. 47. – P. 1060–1069.
23. Haroun, S.; Nait Seghir, A.; Touati, S. Feature Selection for Enhancement of Bearing Fault Detection and Diagnosis Based on Self-Organizing Map / S. Haroun, A. Nait Seghir, S. Touati // Recent Advances in Electrical Engineering and Control Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering. – Cham, Switzerland : Springer, 2017. – Vol. 411.
24. Tandon, N. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings / N. Tandon, A. Choudhury // Tribol. Int. – 1999. – Vol. 32. – P. 469–480.
25. Zandi, O. Brushless DC Motor Bearing Fault Detection Using Hall Effect Sensors and a Two-Stage Wavelet Transform / O. Zandi, J. Poshtan // Proceedings of the 26th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2018), Mashhad, Iran, 8–10 May 2018. – P. 827–833.
26. Liu, Z. A review of failure modes, condition monitoring and fault diagnosis methods for large-scale wind turbine bearings / Z. Liu, L. Zhang // Measurement. – 2020. – Vol. 149. – P. 107002.
27. Rolling Bearings – Damage and Failures – Terms, Characteristics and Causes. – Geneva, Switzerland : International Organization for Standardization, 2017. – ISO 15243:2017 ; publication date: March 2017.
28. Radu, C. The Most Common Causes of Bearing Failure and the Importance of Bearing Lubrication. RKB Technical Review / C. Radu. – February 2010. – P. 1–7. – Режим доступа: <https://www.rkbbearings.com/en/publications.php#sec12>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 23.12.2020).
29. Bearing Damage and Failure Analysis, SKF Group, PUB BU/13 14219/2 EN. – June 2017. – P. 1–106. – Режим доступа: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968064c148-Bearing-failures---14219_2-EN_tcm_12-297619.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 23.12.2020).

30. Smith, S. W. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists* / S. W. Smith. – Burlington, VT, USA : Elsevier Science, 2002.
31. Lee, C.-Y. Bearing damage detection of BLDC motors based on current envelope analysis / C.-Y. Lee, Y.-H. Hsieh // *Meas. Sci. Rev.* – 2012. – Vol. 12. – P. 290–295.
32. Espinosa, A. G. Fault Detection by Means of Hilbert-Huang Transform of the Stator Current in a PMSM With Demagnetization / A. G. Espinosa, J. A. Rosero, J. Cusid'o, L. Romeral, J. A. Ortega // *IEEE Trans. Energy Convers.* – 2010. – Vol. 25. – P. 312–318.
33. Bishop, M. C. *Neural Networks for Pattern Recognition* / M. C. Bishop. – 1st ed. – New York, NY, USA : Oxford University Press, 1996.
34. Haykin, S. *Neural Networks, a Comprehensive Foundation* / S. Haykin. – New York, USA : Macmillan College Publishing Company, 1994.
35. Yu, H. Levenberg-Marquardt Training / H. Yu, B. M. Wilamowski // *Industrial Electronics Handbook*. – 2nd ed. – Boca Raton, FL, USA : Intelligent Systems, CRC Press, 2011. – Chapter 12, Vol. 5. – P. 12–1–12–15.
36. Demuth, H. *Neural Network Toolbox – User's Guide. Version 4* / H. Demuth, M. Beale. – Natick, MA, USA : The MathWorks, Inc., 2004.
37. Du, Y.-C. Levenberg-Marquardt Neural Network Algorithm for Degree of Arteriovenous Fistula Stenosis Classification Using a Dual Optical Photoplethysmography Sensor / Y.-C. Du, A. Stephanus // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18. – P. 2322.
38. Zayani, R. Levenberg-Marquardt learning neural network for adaptive predistortion for time-varying HPA with memory in OFDM systems / R. Zayani, R. Bouallegue, D. Roviras // *Proceedings of the EUSIPCO2008 – 16th European Signal Processing Conference, Lausanne, Switzerland, 25–29 August 2008*. – P. 1–6. – Режим доступа: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02457894>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 09.12.2020).
39. Jazayeri, K. Comparative Analysis of Levenberg-Marquardt and Bayesian Regularization Backpropagation Algorithms in Photovoltaic Power Estimation Using Artificial Neural Network / K. Jazayeri, M. Jazayeri, S. Uysal // *Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects. ICDM 2016*. – Cham, Switzerland : Springer, 2016. – Vol. 9728.
40. Suliman, A. Applying Bayesian Regularization for Acceleration of Levenberg-Marquardt based Neural Network Training / A. Suliman, B. S. Omarov // *Int. J. Interact. Multimed. Artif. Intell.* – 2018. – Vol. 5. – P. 68–72.
41. Gil, D. Supervised SOM Based Architecture versus Multilayer Perceptron and RBF Networks / D. Gil, M. Johnsson // *Proceedings of the 26th Annual Workshop of the Swedish Artificial Intelligence Society (SAIS), Uppsala, Sweden, 20–21 May 2010*. – P. 15–24.
42. Bayram, S. Comparison of multilayer perceptron (MLP) and radial basis function (RBF) for construction cost estimation: The case of Turkey / S. Bayram, M. E. Ocal, E. Laptali Oral, C. D. Atis // *J. Civ. Eng. Manag.* – 2016. – Vol. 22. – P. 480–490.
43. Fath, A. H. Implementation of multilayer perceptron (MLP) and radial basis function (RBF) neural networks to predict solution gas-oil ratio of crude oil systems / A. H. Fath, F. Madanifar, M. Abbasi // *Petroleum*. – 2020. – Vol. 6. – P. 80–91.
44. Jaganathan, B. Optimal parameters estimation of a BLDC motor by Kohonen's Self Organizing Map Method / B. Jaganathan, S. Venkatesh, Y. Bhardwaj, V. Sridhar // *Proceedings of the 2011 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems, Trivandrum, Kerala, India, 22–24 September 2011*. – P. 068–071.
45. Jacobs, S. Self-organizing maps for monitoring parameter deterioration of DC and AC motors / S. Jacobs, F. Rios-Gutierrez // *Proceedings of the 2013 Proceedings of IEEE Southeastcon, Jacksonville, FL, USA, 4–7 April 2013*. – P. 1–6.
46. Khalifaoui, N. The SOM tool in mechanical fault detection over an electric asynchronous drive. / N. Khalifaoui, M. S. Salhi, H. Amiri // *Proceedings of the 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), Hammamet, Tunisia, 16–18 December 2016*. – P. 1–6.
47. Skowron, M.; Orłowska-Kowalska, T. Efficiency of cascade-connected neural networks in detecting initial faults to induction motor drive electric windings / M. Skowron, T. Orłowska-Kowalska // *Electronics*. – 2020. – Vol. 9. – P. 1314.
48. Dogan, Y. SOM++: Integration of Self-Organizing Map and K-Means++ Algorithms / Y. Dogan, D. Birant, A. Kut // *Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition. MLDM 2013*. – Berlin/Heidelberg, Germany : Springer, 2013. – Vol. 7988.
49. Bataineh, A. K. K-Means Clustering in WSN with Kohonen SOM and Conscience Function / A. K. Bataineh, M. H. Samkari, A. Abdulla, S. Al-Azzam // *Mod. Appl. Sci.* – 2019. – Vol. 13. – P. 63–75.
50. Ewert, P.; Orłowska-Kowalska, T.; Jankowska, K. Effectiveness Analysis of PMSM Motor Rolling Bearing Fault Detectors Based on Vibration Analysis and Shallow Neural Networks / P. Ewert, T. Orłowska-Kowalska, K. Jankowska // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – P. 712.

References

1. Ullah, Z., Lodhi, B. A., Hur, J. Detection and Identification of Demagnetization and Bearing Faults in PMSM Using Transfer Learning-Based VGG. *Energies*, 2020, vol. 13, p. 3834.
2. Chen, Y., Liang, S., Li, W., Liang, H., Wang, C. Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review. *Appl. Sci.*, 2019, vol. 9, p. 2116.
3. Rosero, J., Romeral, L., Rosero, E., Urresty, J. Fault Detection in dynamic conditions by means of Discrete Wavelet Decomposition for PMSM running under Bearing Damage. *Proceedings of the 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Washington, DC, USA, 15–19 February 2009*, pp. 951–956.
4. He, J., Somogyi, C., Strandt, A., Demerdash, N. A. O. Diagnosis of stator winding short-circuit faults in an interior permanent magnet synchronous machine. *Proceedings of the 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, USA, 14–18 September 2014*, pp. 3125–3130.
5. Nkuna, J. S. R. *Vibration Condition Monitoring and Fault Classification of Rolling Element Bearings Utilising Kohonen's Self-organising Maps : Theses and Dissertations (Mechanical Engineering). Ph.D. Thesis.* Vanderbijlpark, South Africa, Vaal University of Technology, 2013.
6. Picot, A., Obeid, Z., Regnier, J., Poignant, S., Darnis, O., Maussion, P. Statistic-based spectral indicator for bearing fault detection in permanent-magnet synchronous machines using the stator current. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2014, vol. 46, pp. 424–441.

7. Ye, M., Huang, J. Bearing Fault Diagnosis under Time-Varying Speed and Load Conditions via Speed Sensorless Algorithm and Angular Resample. *Proceedings of the 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 3–6 September 2018*, pp. 1775–1781.
8. Lu, S., He, Q., Zhao, J. Bearing fault diagnosis of a permanent magnet synchronous motor via a fast and online order analysis method in an embedded system. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2018, vol. 113, pp. 36–49.
9. Nembhard, A. D., Sinha, J. K., Pinkerton, A. J., Elbhah, K. Fault diagnosis of rotating machines using vibration and bearing temperature measurements. *Diagnostyka*, 2013, vol. 14, pp. 45–51.
10. Rosero, J., Cusido, J., Ortega, J. A., Romeral, L., Garcia, A. PMSM Bearing Fault Detection by means of Fourier and Wavelet transform. *Proceedings of the IECON 2007 – 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, Taiwan, 5–8 November 2007*, pp. 1163–1168.
11. Liu, H., Li, D., Yuan, Y., Zhang, S., Zhao, H., Deng, W. Fault Diagnosis for a Bearing Rolling Element Using Improved VMD and HT. *Appl. Sci.*, 2019, vol. 9, p. 1439.
12. Ren, B., Yang, M., Chai, N., Li, Y., Xu, D. Fault Diagnosis of Motor Bearing Based on Speed Signal Kurtosis Spectrum Analysis. *Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 11–14 August 2019*, pp. 1–6.
13. Skora, M., Ewert, P., Kowalski, C. T. Selected Rolling Bearing Fault Diagnostic Methods in Wheel Embedded Permanent Magnet Brushless Direct Current Motors. *Energies*, 2019, vol. 12, p. 4212.
14. Ewert, P., Kowalski, C. T., Orłowska-Kowalska, T. Low-Cost Monitoring and Diagnosis System for Rolling Bearing Faults of the Induction Motor Based on Neural Network Approach. *Electronics*, 2020, vol. 9, p. 1334.
15. Senanayaka, J. S. L., Huynh, V. K., Robbersmyr, K. G. A robust method for detection and classification of permanent magnet synchronous motor faults: Deep autoencoders and data fusion approach. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018, vol. 1037, p. 032029.
16. Senanayaka, J. S. L., Huynh, V. K., Robbersmyr, K. G. Fault detection and classification of permanent magnet synchronous motor in variable load and speed conditions using order tracking and machine learning. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018, vol. 1037, p. 032028.
17. Akar, M., Hekim, M., Orhan, U. Mechanical fault detection in permanent magnet synchronous motors using equal width discretization-based probability distribution and a neural network model. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 2015, vol. 23, pp. 813–823.
18. Pandarakone, S. E., Mizuno, Y., Nakamura, H. Distinct Fault Analysis of Induction Motor Bearing Using Frequency Spectrum Determination and Support Vector Machine. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2017, vol. 53, pp. 3049–3056.
19. Navasari, E., Asfani, D. A., Negara, M. Y. Detection Of Induction Motor Bearing Damage With Starting Current Analysis Using Wavelet Discrete Transform And Artificial Neural Network. *Proceedings of the 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Kuta, Indonesia, 24–26 July 2018*, pp. 316–319.
20. Hoang, D. T., Kang, H. J. A Motor Current Signal-Based Bearing Fault Diagnosis Using Deep Learning and Information Fusion. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2020, vol. 69, pp. 3325–3333.
21. Zhou, J., Qin, Y., Kou, L., Yuwono, M., SU, S. Fault detection of rolling bearing based on FFT and classification. *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, 2015, vol. 9.
22. Li, B.; Chow, M.-Y.; Tipsuwan, Y.; Hung, J.C. Neural-Network-Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2000, vol. 47, pp. 1060–1069.
23. Haroun, S., Nait Seghir, A., Touati, S. Feature Selection for Enhancement of Bearing Fault Detection and Diagnosis Based on Self-Organizing Map. *Recent Advances in Electrical Engineering and Control Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Cham, Switzerland, Springer, 2017, vol. 411.
24. Tandon, N., Choudhury, A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribol. Int.*, 1999, vol. 32, pp. 469–480.
25. Zandi, O., Poshtan, J. Brushless DC Motor Bearing Fault Detection Using Hall Effect Sensors and a Two-Stage Wavelet Transform. *Proceedings of the 26th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2018), Mashhad, Iran, 8–10 May 2018*, pp. 827–833.
26. Liu, Z., Zhang, L. A review of failure modes, condition monitoring and fault diagnosis methods for large-scale wind turbine bearings. *Measurement*, 2020, vol. 149, p. 107002.
27. *Rolling Bearings – Damage and Failures – Terms, Characteristics and Causes*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2017. ISO 15243:2017 ; publication date: March 2017.
28. Radu, C. *The Most Common Causes of Bearing Failure and the Importance of Bearing Lubrication*. RKB Technical Review, February 2010, pp. 1–7. Available at: <https://www.rkbbearings.com/en/publications.php#sec12> (accessed 23.12.2020).
29. *Bearing Damage and Failure Analysis, SKF Group, PUB BU/13 14219/2 EN*. June 2017, pp. 1–106. Available at: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968064c148-Bearing-failures---14219_2-EN_tcm_12-297619.pdf (accessed 23.12.2020).
30. Smith, S. W. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Burlington, VT, USA, Elsevier Science, 2002.
31. Lee, C.-Y., Hsieh, Y.-H. Bearing damage detection of BLDC motors based on current envelope analysis. *Meas. Sci. Rev.*, 2012, vol. 12, pp. 290–295.
32. Espinosa, A. G., Rosero, J. A., Cusido, J., Romeral, L., Ortega, J. A. Fault Detection by Means of Hilbert-Huang Transform of the Stator Current in a PMSM With Demagnetization. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2010, vol. 25, pp. 312–318.
33. Bishop, M. C. *Neural Networks for Pattern Recognition*. 1st ed. New York, NY, USA, Oxford University Press, 1996.
34. Haykin, S. *Neural Networks, a Comprehensive Foundation*. New York, NY, USA, Macmillan College Publishing Company, 1994.
35. Yu, H., Wilamowski, B. M. Levenberg-Marquardt Training. *Industrial Electronics Handbook*. 2nd ed. Boca Raton, FL, USA, Intelligent Systems, CRC Press, 2011, Chapter 12, vol. 5, pp. 12–1–12–15.

36. Demuth, H., Beale, M. *Neural Network Toolbox – User's Guide. Version 4*. Natick, MA, USA, The MathWorks, Inc., 2004.
37. Du, Y.-C., Stephanus, A. Levenberg-Marquardt Neural Network Algorithm for Degree of Arteriovenous Fistula Stenosis Classification Using a Dual Optical Photoplethysmography Sensor. *Sensors*, 2018, vol. 18, p. 2322.
38. Zayani, R., Bouallegue, R., Roviras, D. Levenberg-Marquardt learning neural network for adaptive predistortion for time-varying HPA with memory in OFDM systems. *Proceedings of the EUSIPCO2008 – 16th European Signal Processing Conference, Lausanne, Switzerland, 25–29 August 2008*, pp. 1–6. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02457894> (accessed 09.12.2020).
39. Jazayeri, K., Jazayeri, M., Uysal, S. Comparative Analysis of Levenberg-Marquardt and Bayesian Regularization Backpropagation Algorithms in Photovoltaic Power Estimation Using Artificial Neural Network. *Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects. ICDM 2016*. Cham, Switzerland, Springer, 2016, vol. 9728.
40. Suliman, A., Omarov, B. S. Applying Bayesian Regularization for Acceleration of Levenberg-Marquardt based Neural Network Training. *Int. J. Interact. Multimed. Artif. Intell.*, 2018, vol. 5, pp. 68–72.
41. Gil, D., Johnsson, M. Supervised SOM Based Architecture versus Multilayer Perceptron and RBF Networks. *Proceedings of the 26th Annual Workshop of the Swedish Artificial Intelligence Society (SAIS), Uppsala, Sweden, 20–21 May 2010*, pp. 15–24.
42. Bayram, S., Ocal, M. E., Laptali Oral, E., Atis, C. D. Comparison of multilayer perceptron (MLP) and radial basis function (RBF) for construction cost estimation: The case of Turkey. *J. Civ. Eng. Manag.*, 2016, vol. 22, pp. 480–490.
43. Fath, A. H., Madanifar, F., Abbasi, M. Implementation of multilayer perceptron (MLP) and radial basis function (RBF) neural networks to predict solution gas-oil ratio of crude oil systems. *Petroleum*, 2020, vol. 6, pp. 80–91.
44. Jaganathan, B., Venkatesh, S., Bhardwaj, Y., Sridhar, V. Optimal parameters estimation of a BLDC motor by Kohonen's Self Organizing Map Method. *Proceedings of the 2011 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems, Trivandrum, Kerala, India, 22–24 September 2011*, pp. 068–071.
45. Jacobs, S., Rios-Gutierrez, F. Self-organizing maps for monitoring parameter deterioration of DC and AC motors. *Proceedings of the 2013 Proceedings of IEEE Southeastcon, Jacksonville, FL, USA, 4–7 April 2013*, pp. 1–6.
46. Khalfaoui, N., Salhi, M. S., Amiri, H. The SOM tool in mechanical fault detection over an electric asynchronous drive. *Proceedings of the 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), Hammamet, Tunisia, 16–18 December 2016*, pp. 1–6.
47. Skowron, M., Orłowska-Kowalska, T. Efficiency of cascade-connected neural networks in detecting initial faults to induction motor drive electric windings. *Electronics*, 2020, vol. 9, p. 1314.
48. Dogan, Y., Birant, D., Kut, A. SOM++: Integration of Self-Organizing Map and K-Means++ Algorithms. *Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition. MLDM 2013*. Berlin/Heidelberg, Germany, Springer, 2013, vol. 7988.
49. Bataineh, A. K., Samkari, M. H., Abdualla, A., Al-Azzam, S. K-Means Clustering in WSN with Kohonen SOM and Conscience Function. *Mod. Appl. Sci.*, 2019, vol. 13, pp. 63–75.
50. Ewert, P., Orłowska-Kowalska, T., Jankowska, K. Effectiveness Analysis of PMSM Motor Rolling Bearing Fault Detectors Based on Vibration Analysis and Shallow Neural Networks. *Energies*, 2021, vol. 14, p. 712.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. В журнале публикуются материалы на английском и русском языках по тематике, соответствующей утвержденным для журнала отраслям наук, группам специальностей.

2. В список соавторов работ включаются только те лица, которые внесли творческий вклад в подготовку представленных материалов. Лицам, оказавшим только техническую помощь, можно выразить благодарность в конце статьи. Один человек может быть автором (соавтором) не более чем двух статей в одном номере журнала, причем единственным автором он может быть только в одной статье.

3. Объем публикаций для научных статей должен быть не менее 8 страниц, а количество источников в библиографическом списке (списке литературы) – не менее 10 позиций.

4. **Содержание** каждой статьи должно включать следующие элементы: УДК; название статьи; сведения об авторах, включая их место работы, должность, адрес электронной почты; аннотацию объемом от 100 до 250 слов, ключевые слова (от 9 до 13); графическую аннотацию, отражающую содержание статьи; название статьи, сведения об авторах, аннотацию и ключевые слова на английском языке (для англоязычных статей – на русском языке); введение – оно должно заканчиваться формулировкой цели работы в явной форме; собственно текст статьи – очень желательна его сегментация на разделы, имеющие содержательные заголовки; выводы или заключение (должны соответствовать формулировке цели статьи).

5. Для русскоязычных статей приводится два библиографических списка: на языке оригинала статьи; список с транслитерацией русскоязычных источников на латиницу и (дополнительно) приведением в квадратных скобках переводов названий статей и названий источников на английский язык.

В «русскоязычном» библиографическом списке (списке литературы) порядок следования источников – по алфавиту фамилий авторов (сначала русскоязычные источники, потом иноязычные). На все источники, включенные в библиографический список, должны быть даны ссылки в тексте статьи в квадратных скобках. При необходимости авторы могут указывать номера страниц в источниках, на которые даются ссылки. Приветствуются ссылки на иноязычные источники, а также на материалы, опубликованные ранее в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии». Однако в последнем случае количество таких ссылок не должно превышать 20 % от общего количества источников, включенных в библиографический список. Для источников, имеющих DOI, целесообразно его указывать. При ссылках на статьи, опубликованные в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии», целесообразно в конце библиографического описания источника в круглых скобках указывать гиперссылку, указывающую на место размещения статьи на страничке сайта Астраханского государственного университета.

Ссылки в библиографическом списке на материалы, размещенные в интернете, допускаются при соблюдении следующих условий: если у материала, на который дается ссылка, имеется автор и/или название, то они должны быть указаны для этого источника; должен быть приведен полный маршрут доступа к источнику в интернете; должна быть указана дата обращения (доступа) к источнику.

Ограничения по списку литературы: доля самоцитирований для любого из авторов статьи, а также по совокупности всех авторов статьи, не должна превышать 25 %; доля ссылок на статьи с участием одного автора, не являющегося автором (соавтором) статьи, не должна превышать 25 %.

6. Суммарная доля таблиц и иллюстраций в общем объеме представляемой статьи не должна превышать 40 %. Под иллюстрациями понимаются следующие объекты: диаграммы; графики; рисунки; эскизы; фотографии; карты и т.п.

7. Доля оригинального текста в статьях (оцениваемого через систему «Антиплагиат» на сайте www.antiplagiat.ru) должна быть не менее 80 %.

8. Указание на то, что работа финансируется по какому-либо гранту, в рамках Федеральной целевой программы, государственного заказа и пр. дается в виде постраничной сноски после заголовка (названия) работы.

9. В сведения об авторах работ помимо места работы и должности целесообразно включать ORCID автора и гиперссылку на страничку с его личными наукометрическими показателями на сайте www.elibrary.ru. По желанию можно привести также ссылки на странички с наукометрическими показателями на Scopus, в ResearchGate; на личную страничку, размещенную на сайте организации.

10. Основные технические требования к оформлению статей (материалов):

10.1. Текст должен быть расположен по ширине страницы формата А4 с учётом полей (все поля по 2,5 см), набран шрифтом Times New Roman, кегль 10, межстрочный интервал 1,0. В таблицах, подрисуночных надписях допускается уменьшенный шрифт – вплоть до 8 кегля. Альбомная ориентация страниц допускается только в порядке исключения для следующих случаев: широкоформатные таблицы с большим количеством колонок; иллюстрации большого размера, которые не умещаются на странице с книжной ориентацией.

Абзацные отступы одинаковы по всему тексту – 0,75 см. Кавычки («»), скобки ([], ()), маркеры и другие знаки должны быть аналогичными на протяжении всего предоставляемого для публикации материала.

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2022
№ 2 (58)**

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Федеральной службы по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия
ПИ № ФС77-31932 от 16 мая 2008 г.

Учредитель
Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Адрес редакции:
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20

Адрес издателя:
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Издание включено в Интернет-каталог
ООО «Агентство «Книга-Сервис» 2022/1

Главный редактор И.М. Ажмухамедов

Редактирование,
компьютерная правка, вёрстка *Н.Н. Сахно*

Дата выхода в свет 30.06.2022 г.

Цена свободная
Уч.-изд. 13,6. Усл. печ. л. 19,0.
Заказ № 4440. Тираж 500 экз. (первый завод – 23 экз.)

Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а
Тел. (8512) 24-64-95, тел./факс (8512) 24-68-37
E-mail: asupress@yandex.ru

Отпечатано в АО «Т 8 Издательские Технологии» (АО «Т 8»)
г. Москва, Волгоградский проспект, дом 42, корп. 5