

# ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ



УПРАВЛЕНИЕ И ВЫСОКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ

2024  
№1 (65)



ISSN 2074-1707

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В.Н. ТАТИЩЕВА

# ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2024**  
**№ 1 (65)**

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  
2024

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

**ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:**  
**управление и высокие технологии**  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2024**  
**№ 1 (65)**

**Редакционная коллегия**

*И.М. Азмухамедов*, доктор технических наук, профессор, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности, профессор кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева (главный редактор)

*И.В. Аникин*, доктор технических наук, профессор, 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)

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

*А.С. Катасёв*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем информационной безопасности ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» (г. Казань)

*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*, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационной безопасности Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева

*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

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

*Е.В. Никольцев*, 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. Рыбиков*, кандидат физико-математических наук, директор «Физико-математического института» Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева; доцент кафедры электротехники, электроники и автоматики Астраханского государственного университета им. 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)

*Т.Л. Тен*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» Карагандинского экономического университета (Республика Казань, 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

*С.А. Филит*, 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.mbds-fr.org](http://www.mbds-fr.org))

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

© Астраханский государственный университет,  
имени В.Н. Татищева, 2024  
© Гайфитдинова С. Ю., дизайн обложки, 2024

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

**2024**  
**No. 1 (65)**

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 type 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  
2024

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

**2024  
No. 1 (65)**

**Editorial Board**

*I.M. Azhmukhamedov*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Dean of the Faculty of Digital Technologies and Cybersecurity, Professor of Information Security Department, Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev (**Editor-in-Chief**)

*I.V. Anikin*, Doct. Sci. (Engineering), 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)

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

*A.S. Katasev*, Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Information Security Systems, Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev - KAI "(Kazan)

*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*, Cand. Sci. (Engineering), Senior Lecturer of Information Security Department, Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev

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

*A.M. Likhner*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of General Physics, Astrakhan State University

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

*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 named after V.N. Tatishchev

*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

*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

*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.mbds-fr.org](http://www.mbds-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, 2024  
© S. Yu. Gayfitdinova, cover design, 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

## **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

### **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

**Е. С. Крюкова, И. Б. Паращук, Л. А. Саяркин**

Элементы вычисления нечетких отношений предпочтения  
и сравнения альтернатив в приложении к задачам синтеза  
системы показателей качества реализации поисковых запросов  
пользователей дата-центров и электронных библиотек ..... 9–16

**Ю. А. Смирнова, Е. С. Тарабановская, А. Н. Марьенков**

Составление производственных правил  
при формировании цифрового двойника  
процесса взаимодействия двух молекулярных систем ..... 17–27

**М. А. Кузнецов, А. Н. Земцов, П. С. Ступницкий, В. К. Попов**

Гибкая архитектура системы «Умный дом» ..... 28–36

### **МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

**В. В. Золотарев**

Формирование модели управляемого объекта  
на основе гиперграфа в цикле непрерывного детектирования  
и реагирования на инциденты информационной безопасности ..... 37–44

**В. А. Сугак, Д. А. Мережников, Л. Х. Сафиуллина, А. А. Алексеева**

Повышение грамотности общества  
в области информационной безопасности  
с использованием элементов геймификации ..... 45–53

**В. Ю. Кузнецова, Н. О. Подгорный**

Информационная система генерации нормативных документов  
в области информационной безопасности ..... 54–61

### **УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

**Р. Ю. Борзин, А. Г. Кравец**

Управление киберфизическими системами  
на основе анализа данных мониторинга:  
отрасли применения, проблемы и методы их решения ..... 62–77

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

**Д. С. Соловьев**

Разработка метода, критерия и алгоритма оптимизации  
функционирования интеллектуальной системы управления  
с ассоциативной памятью ..... 78–84

**Н. П. Чернавин**

Анализ финансовых рынков на основе  
моделей математического программирования ..... 85–93

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ  
И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

**Д. М. Коробкин, М. А. Рязанова, С. А. Фоменков, А. В. Бобунов**

Русско-английский параллельный корпус  
для автоматического перевода текста патентов .....94–105

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

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

**А. С. Коновской, С. А. Рутковский, С. В. Нестеров**

Моделирование работы индикатора  
радиолокационной станции кругового обзора ..... 106–115

**А. В. Григорьев**

Влияние величины радиуса круглого фрагмента  
на погрешность измерения интенсивности вибрации  
по приращению площади изображения этого фрагмента ..... 116–121

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ  
(ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ)**

**Е. В. Львова, А. А. Никифоров, О. М. Балабан, М. А. Шаронов**

Сравнение цифровых алгоритмов измерения активной мощности:  
обзор методов обработки дискретного сигнала ..... 122–136

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ..... 137**

# CONTENTS

## **INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL**

### **SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING**

#### **E. S. Kryukova, I. B. Parashchuk, L. A. Sayarkin**

Elements of calculating fuzzy preference relations  
and comparing alternatives in the application to the tasks  
of synthesizing a system of quality indicators for the implementation  
of user search queries data centers and electronic libraries ..... 9–16

#### **Yu. A. Smirnova, E. S. Tarabanovskaya, A. N. Marenkov**

Development of an algorithm and method  
of record transformation of atomic and molecular systems ..... 17–27

#### **M. A. Kuznetsov, A. N. Zemtsov, P. S. Stupnitsky, V. K. Popov**

Flexible smart home architecture ..... 28–36

### **METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION PROTECTION, INFORMATION SECURITY**

#### **V. V. Zolotarev**

Controlled object model based on a hypergraph  
in the continuous detection and response cycle  
to information security incidents ..... 37–44

#### **V. A. Sugak, D. A. Merezchnikov, L. K. Safiullina, A. A. Alekseeva**

Increasing public literacy in the field of information security  
using gamification elements ..... 45–53

#### **V. Yu. Kuznetsova, N. O. Podgornyi**

Information system for generating regulative documents  
in the field of information security ..... 54–61

### **MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS**

#### **R. Yu. Borzin, A. G. Kravets**

Control of cyberphysical systems  
based on the analysis of monitoring data:  
applications, problems and methods of their solution ..... 62–77

### **MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM SYSTEMS**

#### **D. S. Solovjev**

Development of a method, criterion and algorithm for optimizing  
the functioning of an intelligent control system  
with associative memory ..... 78–84

#### **P. N. Chernavin**

Analysis of financial markets  
based on mathematical programming models ..... 85–93

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

**D. M. Korobkin, M. A. Ryazanova, S. A. Fomenkov, A. V. Bobunov**

The russian-english parallel corpus  
for automatic translation of the patent texts .....94–105

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

**INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS**

**A. S. Konovskoj, S. A. Rutkovskij, S. V. Nesterov**

Simulation of the operation  
of the all-round view indicator of a radar station ..... 106–115

**A. V. Grigoryev**

Influence of the radius of a circular fragment  
on the error of measurement of vibration intensity  
by increment in the image area of this fragment ..... 116–121

**INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT  
(BY TYPE OF MEASUREMENT)**

**E. V. Lvova, A. A. Nikiforov, O. M. Balaban, M. A. Sharonov**

Comparison of digital algorithms for active power measuring:  
a review of discrete signal processing methods ..... 122–136

**RULES FOR THE AUTHORS .....137**

# **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

УДК 004:9

### **ЭЛЕМЕНТЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ НЕЧЕТКИХ ОТНОШЕНИЙ ПРЕДПОЧТЕНИЯ И СРАВНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ПОИСКОВЫХ ЗАПРОСОВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ДАТА-ЦЕНТРОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ БИБЛИОТЕК**

*Крюкова Елена Сергеевна*, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, кандидат технических наук, преподаватель, ORCID: 0000-0001-7482-056, e-mail: e.krukovaa69@yandex.ru

*Паращук Игорь Борисович*, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-8793-7768, e-mail: shchuk@rambler.ru  
*Саяркин Леонид Андреевич*, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, соискатель, ORCID: 0009-0003-9945-5266, e-mail: leonid.sayarkin@yandex.ru

Рассмотрен ряд условий и особенностей применения методов определения нечетких отношений предпочтения в сочетании с алгоритмами анализа и сравнения недоминирующих альтернатив в интересах формулировки оптимального состава и номенклатуры системы показателей качества информационного поиска на ресурсах современных дата-центров и электронных библиотек. Данный подход опирается на известные методы теории нечетких множеств, теории синтеза оптимальных систем, теории качества и традиционные методы классификации показателей существенных свойств сложных процессов, учитывающие аспекты релевантности, оперативности, адекватности и минимальной размерности результатов реализации поисковых запросов. Рассмотрены этапы, физическая сущность и математические аспекты подходов, реализующих синтез оптимальной системы показателей релевантности процессов такого класса в условиях априорной неопределенности (нечеткости) исходных данных. Практическое применение предложенного подхода позволит повысить объективность формулировки исходных данных для информационного поиска, достоверность определения состава множества оцениваемых параметров качества реализации поисковых запросов, создавая тем самым предпосылки для повышения эффективности процессов такого класса в целом.

**Ключевые слова:** дата-центр, электронная библиотека, поисковый запрос, система показателей качества, информационный поиск, синтез, нечеткое отношение предпочтения, сравнение альтернатив, этап

### **ELEMENTS OF CALCULATING FUZZY PREFERENCE RELATIONS AND COMPARING ALTERNATIVES IN THE APPLICATION TO THE TASKS OF SYNTHESIZING A SYSTEM OF QUALITY INDICATORS FOR THE IMPLEMENTATION OF USER SEARCH QUERIES DATA CENTERS AND ELECTRONIC LIBRARIES**

*Kryukova Elena S.*, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), teacher, ORCID: 0000-0001-7482-056, e-mail: e.krukovaa69@yandex.ru

*Parashchuk Igor B.*, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-8793-7768, e-mail: shchuk@rambler.ru

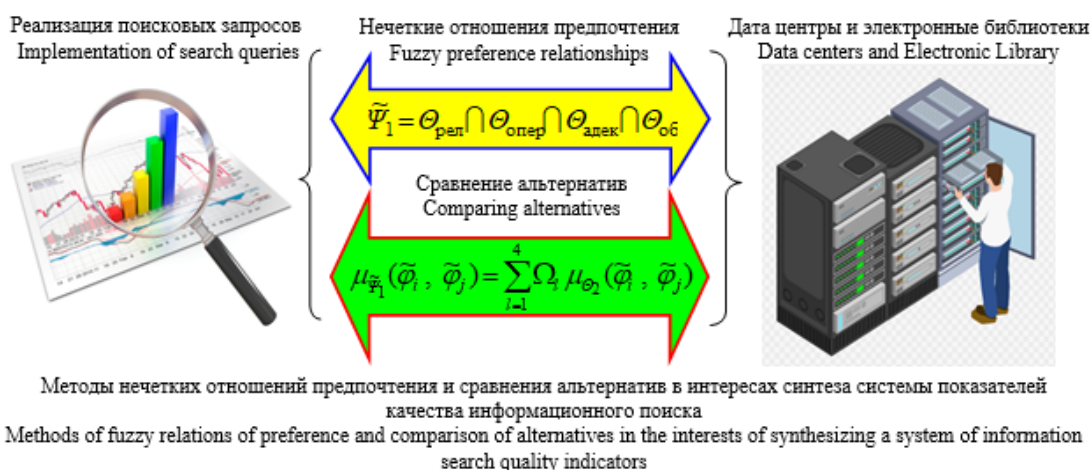
*Sayarkin Leonid A.*, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, applicant, ORCID: 0009-0003-9945-5266, e-mail: leonid.sayarkin@yandex.ru

A number of conditions and features of the application of methods for determining fuzzy preference relations in combination with algorithms for analyzing and comparing non-dominant alternatives in the interests of formulating the optimal composition and nomenclature of the information search quality indicators system on the resources of modern data centers and electronic libraries are considered. This approach is based on well-known methods of fuzzy set theory, optimal systems synthesis theory, quality theory and traditional methods of classifying indicators of essential

properties of complex processes, taking into account aspects of relevance, efficiency, adequacy and minimum dimension of search query results. The stages, physical essence and mathematical aspects of approaches implementing the synthesis of an optimal system of indicators of the relevance of processes of this class under conditions of a priori uncertainty (fuzziness) of the initial data are considered. The practical application of the proposed approach will increase the objectivity of the formulation of the source data for information search, will increase the reliability of determining the composition of the set of estimated parameters of the quality of search query implementation, thereby creating prerequisites for improving the efficiency of processes of this class as a whole.

**Keywords:** data center, electronic library, search queries, quality indicator system, information search, synthesis, fuzzy preference relationships, comparison of alternatives, stage

#### Graphical annotation (Графическая аннотация)



#### ВВЕДЕНИЕ

Весомым, сложным и, на наш взгляд, особо значимым этапом создания новой, инновационной методологии оценки качества реализации поисковых запросов пользователей (РПЗП) современных дата-центров (ДЦ) и электронных библиотек (ЭБ) по праву считается этап синтеза иерархически связанных систем показателей качества (ПК) подобных управляемых процессов.

С точки зрения системного подхода, это, по сути, этап формирования (разработки) пространств состояний и формулировки показателей и критериев оценивания качества процесса (качества результатов процесса) поиска необходимого пользователям контента на информационных ресурсах ДЦ и ЭБ. Этап синтеза систем ПК (СПК) и критериев оценивания качества РПЗП всегда актуален и методологически важен, потому как никакие практичность и комфорт использования математического и методологического аппарата, применяемого для контроля информационного поиска на ресурсах ДЦ и ЭБ, для мониторинга самих информационно-поисковых и информационно-справочных систем такого класса, не сумеют возместить ошибки и негативные последствия неправильно сформулированных пространств (множеств, систем) ПК, пространств их состояний и критериев оценивания ПК РПЗП современных ДЦ и ЭБ [1, 2].

Таким образом, в рамках многокритериального анализа качества РПЗП современных ДЦ и ЭБ решается задача синтеза оптимальной СПК информационного поиска – вектора показателей существенных свойств объекта исследования. Детальное рассмотрение возможных подходов к реализации алгоритмов синтеза СПК сложных систем и процессов можно найти в работах [3–5].

Эти подходы ориентированы в основном на использование математических методов редукции, структурной, функциональной и параметрической декомпозиции глобальной СПК сложных систем и процессов на ряд локальных систем показателей качества, характеризующих эти объекты. Эти подходы к формированию состоятельных и адекватных условий и задач контроля СПК РПЗП, отвечающих критерию минимальной избыточности, используют, в частности, известные теоремы декомпозиции для решения задачи синтеза иерархически связанных систем показателей. При этом декомпозиция глобальных СПК (ГСПК) предусматривает их замену эквивалентным множеством локальных СПК (ЛСПК) РПЗП ДЦ и ЭБ. Это обычно достигается путем так называемой поэтапной декомпозиции, при которой: на первом этапе ГСПК преобразовываются в вид, удобный для реализации алгоритмов декомпозиции; на втором этапе осуществляется собственно декомпозиция ГСПК, а на третьем этапе – декомпозиция полученных ЛСПК РПЗП ДЦ и ЭБ.

Рассмотренные в работах [3–5] и используемые ранее подходы являются математически корректными, однако при этом не учитывают субъективный фактор, вносимый пользователями

при классификации и определении приоритетов и предпочтений среди частных ПК информационного поиска, не учитывают нечеткость мнений экспертов при включении отдельных компонент (частных ПК) в состав глобального вектора показателей существенных свойств РПЗП.

Вместе с тем эта неопределенность существенно важна для исследования, поскольку именно она определяет релевантность и пертинентность как ключевые аспекты качества реализации поисковых запросов пользователей [6–8].

В этой связи особую актуальность, по нашему мнению, приобретает задача синтеза оптимальных СПК РПЗП на информационных ресурсах современных ДЦ и ЭБ с использованием методов теории нечетких множеств – нечетких отношений предпочтения и алгоритмов сравнения нечетких альтернатив [9, 10].

### **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ПОИСКОВЫХ ЗАПРОСОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ОТНОШЕНИЙ ПРЕДПОЧТЕНИЯ И СРАВНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВ**

При выборе метода исследования в интересах синтеза оптимальных СПК РПЗП ДЦ и ЭБ для оценивания качества процессов такого класса учитываются положения теории нечетких множеств [11–13]: в процессе синтеза оптимальной СПК нужно вводить определенные ограничения, так как ГСПК РПЗП необходимо «фрагментировать», разделить (декомпозировать) на совокупность иерархически связанных ЛСПК с учетом неопределенности (нечеткости) критериев и границ информационного поиска на ресурсах ДЦ и ЭБ, с учетом нечеткости приоритетов, неконкретности целей пользователей (экспертов) при формулировке поисковых запросов. Именно это обуславливает необходимость применения методов теории нечетких множеств – нечетких отношений предпочтения и алгоритмов анализа нечетких альтернатив: поскольку взаимосвязь между отдельными процедурами (подпроцессами) РПЗП изоморфна по отношению к взаимосвязи соответствующих ЛСПК информационного поиска, то структура процесса РПЗП, иерархия его отдельных процедур зависят от того, каким образом ГСПК разделяется на ЛСПК РПЗП; в рамках синтеза оптимальной СПК важно поэтапно проанализировать весь процесс разделения ГСПК на частные ЛСПК с учетом того факта, что на каждом этапе применяется отдельный метод обработки нечетких множеств и анализа нечетких отношений.

Иными словами, в рамках синтеза оптимальной безызбыточной и иерархической СПК РПЗП предлагается подход, позволяющий устранить неопределенность (нечеткость) разнородных показателей качества поиска, позволяющий осуществить компромиссное согласование состава СПК для реализации запросов с учетом важности весов этих показателей, например, с учетом их иерархии, что, в конечном итоге, позволит разграничить значимость альтернатив в процедурах и механизмах поиска. При этом главным способом разработки СПК РПЗП остается подход, когда с использованием нечетких отношений предпочтения и алгоритмов анализа нечетких альтернатив формулируется такое оптимальное множество ПК информационного поиска, которое соответствует совокупности свойств, влияющих на итоговое качество данного процесса в целом. Затем производится синтез дополнительных ПК, позволяющих соединить исходные СПК в ГСПК, характеризующие в целом всю комплексную задачу обеспечения качества реализации поисковых запросов.

Предположим, что неоптимизированная, априори избыточная ГСПК РПЗП формально представлена в виде вектора  $\vec{\Phi}_{рпзп}(k)$ , состоящего, например, из 4 (четырех) векторных ЛСПК, характеризующих различные аспекты качества информационного поиска:

$$\vec{\Phi}_{рпзп}(k) = \{ \vec{\Phi}_{рел}(k); \vec{\Phi}_{опер}(k); \vec{\Phi}_{адек}(k); \vec{\Phi}_{об}(k) \} \quad (1)$$

где  $\vec{\Phi}_{рел}(k)$  – векторная локальная система показателей релевантности (векторная ЛСПК), характеризующая уровни соответствия различных запросов текущим требованиям пользователя на  $k$ -м шаге РПЗП;

$\vec{\Phi}_{опер}(k)$  – векторная ЛСПК оперативности поиска, характеризующая время реализации различных поисковых запросов на  $k$ -м шаге РПЗП (интервалы времени поиска);

$\vec{\Phi}_{адек}(k)$  – векторная ЛСПК адекватности, характеризующая степень достоверности (безошибочности) результатов различных поисковых запросов;

$\vec{\Phi}_{об}(k)$  – векторная локальная система показателей объема (размерности) данных, которые необходимо найти в рамках различных поисковых запросов.

Задача: осуществить синтез оптимальной безызбыточной ЛСПК РПЗП, математически и методологически корректно удалив из ее начального состава несколько показателей, несущественных, излишних (по мнению экспертов) для оценки качества процессов такого класса.

Рассмотрим этапы синтеза оптимальной ЛСПК РПЗП, опирающиеся на алгоритмы принятия решений в условиях неопределенности (нечеткости) и основанные на построении множества недоминирующих альтернативных ПК поиска с использованием нечетких отношений предпочтения [9, 10, 13–17].

На первом этапе задаются значения (или интервал значений) сформулированных в виде выражения (1) элементов ЛСПК, т. е. собственно ПК РПЗП на информационных ресурсах ДЦ и ЭБ. В рамках теории нечетких множеств данная процедура называется «определение нечетких переменных (альтернатив)», в нашем случае – показателей качества информационного поиска.

Например, для  $\vec{\Phi}_{\text{рел}}(k)$  – векторной ЛСПК, характеризующей релевантность поиска, т. е. уровни соответствия различных запросов текущим требованиям пользователя на  $k$ -м шаге РПЗП, возможными альтернативами ПК уровня соответствия различных запросов текущим требованиям могут выступать 6 (шесть) допустимых альтернатив, т. е. шесть показателей, характеризующих, в рамках нашего примера, потенциальную релевантность для:  $\{\varphi_{\text{рел ммз}}\}$  – мультимедийных запросов,  $\{\varphi_{\text{рел тз}}\}$  – транзакционных запросов,  $\{\varphi_{\text{рел из}}\}$  – информационных запросов,  $\{\varphi_{\text{рел нз}}\}$  – навигационных запросов,  $\{\varphi_{\text{рел кз}}\}$  – картографических запросов и, наконец,  $\{\varphi_{\text{рел сз}}\}$  – для смешанных (неопределенных) запросов пользователей:

$$\vec{\Phi}_{\text{рел}}(k) = \{\varphi_{\text{рел ммз}}(k); \varphi_{\text{рел тз}}(k); \varphi_{\text{рел из}}(k); \varphi_{\text{рел нз}}(k); \varphi_{\text{рел кз}}(k); \varphi_{\text{рел сз}}(k)\}. \quad (2)$$

На втором этапе каждый из этих показателей качества, характеризующих релевантность информационного поиска, формулируется в виде некоторой переменной, причем значения этих переменных задаются на конкретном базовом (универсальном) множестве значений, а также формируется тип функции принадлежности данной переменной.

Пусть  $X$  – базовое (универсальное) множество показателей качества, характеризующих релевантность информационного поиска,  $x$  – элемент базового множества  $X$ , а  $\Theta$  – определенное свойство, аспект (грань) релевантности информационного поиска. В этом случае нечеткое подмножество  $\Phi$  базового множества  $X$ , элементы которого находятся в соответствии со свойством  $\Theta$ , в терминах теории нечетких множеств определяются как множество упорядоченных пар

$$\tilde{\Phi} = \{\mu_{\tilde{\Phi}}(x) | (x)\}, \quad (3)$$

где  $\mu_{\tilde{\Phi}}(x)$  – функция принадлежности. Это характеристическая функция, принимающая значение 0, если  $x$  полностью не удовлетворяет свойству  $\Theta$ , и 1 – в противном случае. При этом конкретные значения альтернатив (которые являются нечеткими множествами) по всем рассмотренным ранее векторным ЛСПК информационного поиска  $\{\vec{\Phi}_{\text{рел}}(k); \vec{\Phi}_{\text{опер}}(k); \vec{\Phi}_{\text{адек}}(k); \vec{\Phi}_{\text{об}}(k)\}$  находят с использованием характеризующих их функций принадлежности.

Таким образом, речь идет о построении оптимального множества ПК на основе компромиссного сравнения и сочетания альтернативных категорий «важности» для различных показателей информационного поиска с использованием нечетких отношений предпочтения и метода сравнения альтернатив. Для этого на третьем этапе реализации для рассматриваемой (в качестве примера)  $\varphi_{\text{рел}}(k)$  – показателя, характеризующего релевантность поиска (уровни соответствия различных запросов требованиям пользователей на  $k$ -м шаге реализации поисковых запросов), анализируемое нечеткое множество может иметь вид, например:

$$\mu_{\varphi_{\text{рел}}}(k) = \{0,1 | 2; 0,2 | 10; 1 | 20; 1 | 50; 1 | 70; 0,2 | 90; 0,05 | 100\}, \quad (4)$$

где значения функции принадлежности изменяются от 0 до 1 в соответствии с мнением экспертов (0,1; 0,2; 1; 1; 0,2; 0,05) о потенциальном уровне релевантности определенного типа запросов, который можно условно измерить в процентах, например, от 0 до 100 (2, 10, 20, 50, 70, 90, 100). Подобным же образом формируются нечеткие множества  $\mu_{\varphi_{\text{рел}}}(k)$ ,  $\mu_{\varphi_{\text{опер}}}(k)$ ,  $\mu_{\varphi_{\text{адек}}}(k)$  и  $\mu_{\varphi_{\text{об}}}(k)$  для соответствующих векторных локальных СПК информационного поиска  $\{\vec{\Phi}_{\text{рел}}(k); \vec{\Phi}_{\text{опер}}(k); \vec{\Phi}_{\text{адек}}(k); \vec{\Phi}_{\text{об}}(k)\}$ .

Опираясь на эти исходные данные, осуществим синтез оптимальной СПК, используя многокритериальную альтернативу релевантного поиска с максимальной степенью недоминируемости.

На четвертом этапе, используя наши исходные данные, например, для  $\varphi_{\text{рел}}(k) - \{0,1; 0,2; 1; 1; 0,2; 0,05\}$ , выражение (4), для четырех векторных показателей качества информационного поиска (ЛСПК) должны быть составлены матрицы нечетких отношений предпочтения  $\Theta$ , соответственно  $\Theta_{\text{рел}}$ ,  $\Theta_{\text{опер}}$ ,  $\Theta_{\text{адек}}$  и  $\Theta_{\text{об}}$ .

Эти матрицы определены на множестве решений нечеткого подмножества  $\tilde{\Phi}$ , например, для системы показателей релевантности

$$\tilde{\Phi}_{\text{рел}}(k) = \{\tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}(k); \tilde{\varphi}_{\text{рел тз}}(k); \tilde{\varphi}_{\text{рел из}}(k); \tilde{\varphi}_{\text{рел нз}}(k); \tilde{\varphi}_{\text{рел кз}}(k); \tilde{\varphi}_{\text{рел сз}}(k)\} \quad (5)$$

и содержат соответствующие нечеткие отношения предпочтения  $\mu_{\Theta_{\text{рел}}}(k)$ ,  $\mu_{\Theta_{\text{опер}}}(k)$ ,  $\mu_{\Theta_{\text{адек}}}(k)$  и  $\mu_{\Theta_{\text{об}}}(k)$ .

На пятом этапе осуществляется построение нечеткого отношения предпочтения  $\tilde{\Psi}_1$ :

$$\tilde{\Psi}_1 = \Theta_{\text{рел}} \cap \Theta_{\text{опер}} \cap \Theta_{\text{адек}} \cap \Theta_{\text{об}}, \quad (6)$$

где нули либо единицы, характеризующие значения совместной функции принадлежности нескольких  $i$ -х и  $j$ -х нечетких переменных, нечетких ПК ( $\tilde{\varphi}_i$ ;  $\tilde{\varphi}_j$ ) в рамках нечеткого отношения, выступают элементами матрицы нечеткого отношения  $\tilde{\Psi}_1$ :

$$\mu_{\tilde{\Psi}_1} = \{\tilde{\varphi}_i; \tilde{\varphi}_j\}. \quad (7)$$

Шестой этап синтеза оптимальной СПК РПЗП, этап поиска и реализации оптимальной (либо рациональной) многокритериальной альтернативы выбора показателей качества информационного поиска с максимальной степенью недоминируемости, характеризуется определением подмножества недоминирующих альтернатив на нечетком множестве  $\{\tilde{\Phi}, \mu_{\tilde{\Psi}_1}\}$  по всем  $i$ -м и  $j$ -м нечетким переменным ( $\tilde{\varphi}_i$ ;  $\tilde{\varphi}_j$ ), где  $i \neq j$ :

$$\mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_i) = 1 - \sup_{i,j} (\mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_j, \tilde{\varphi}_i) - \mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_i, \tilde{\varphi}_j)). \quad (8)$$

При этом, например, нечеткая переменная  $\{\varphi_{\text{рел ммз}}\}$ , характеризующая в нашем случае одну из альтернатив, – показатель релевантности поиска при реализации мультимедийных запросов, который определяется с использованием подмножества недоминирующих альтернатив (НДА) на нечетком множестве  $\{\tilde{\Phi}, \mu_{\tilde{\Psi}_1}\}$  в соответствии с выражением [10]:

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{\Psi}_1}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}) &= 1 - \sup_{\text{ммз}, \dots, \text{сз}} (\mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_{\text{рел тз}}, \tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}) - \mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}, \tilde{\varphi}_{\text{рел тз}}), \\ &\mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_{\text{рел из}}, \tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}) - \mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}, \tilde{\varphi}_{\text{рел из}}), \mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_{\text{рел нз}}, \tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}) - \\ &- \mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}, \tilde{\varphi}_{\text{рел нз}}), \mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_{\text{рел кз}}, \tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}) - \mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}, \tilde{\varphi}_{\text{рел кз}}), \\ &\mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_{\text{рел сз}}, \tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}) - \mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_{\text{рел ммз}}, \tilde{\varphi}_{\text{рел сз}})) = 1. \end{aligned} \quad (9)$$

Искомые подмножества недоминирующих альтернатив  $\mu_{\tilde{\Psi}_1}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел тз}})$ ,  $\mu_{\tilde{\Psi}_1}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел из}})$ ,  $\mu_{\tilde{\Psi}_1}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел нз}})$ ,  $\mu_{\tilde{\Psi}_1}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел кз}})$  и  $\mu_{\tilde{\Psi}_1}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел сз}})$  для соответствующих нечетких переменных  $\{\tilde{\varphi}_{\text{рел тз}}\}$ ,  $\{\tilde{\varphi}_{\text{рел из}}\}$ ,  $\{\tilde{\varphi}_{\text{рел нз}}\}$ ,  $\{\tilde{\varphi}_{\text{рел кз}}\}$  и  $\{\tilde{\varphi}_{\text{рел сз}}\}$  – показателей релевантности, претендующих на включение в состав оптимальной СПК, определяются аналогично.

В итоге получаем функцию принадлежности из нечеткого множества недоминирующих альтернатив  $\mu_{\tilde{\Psi}_1}^{\text{НДА}}$ , например:

$$\mu_{\tilde{\Psi}_1}^{\text{НДА}} = \{1; 1; 1; 1; 1\}. \quad (10)$$

Седьмой этап синтеза оптимальной СПК РПЗП ориентирован на построение альтернативы выбора показателей качества информационного поиска с максимальной степенью недоминируемости в соответствии с выражением [10]:

$$\mu_{\tilde{\Psi}_1}(\tilde{\varphi}_i, \tilde{\varphi}_j) = \sum_{l=1}^4 \Omega_l \mu_{\Theta_2}(\tilde{\varphi}_i, \tilde{\varphi}_j), \quad (11)$$

где  $\Omega_l$  – коэффициенты относительной «важности» каждого из четырех ( $l = 1, \dots, 4$ ):  $\{\tilde{\Phi}_{\text{рел}}(k); \tilde{\Phi}_{\text{опер}}(k); \tilde{\Phi}_{\text{адек}}(k); \tilde{\Phi}_{\text{об}}(k)\}$  векторных ПК РПЗП, значения которых должны быть определены заранее с использованием экспертных оценок, например,  $\Omega_{\text{рел}} = 0,59$ ;  $\Omega_{\text{опер}} = 0,14$ ;  $\Omega_{\text{адек}} = 0,18$ ;  $\Omega_{\text{об}} = 0,09$ .

В результате находим нечеткое отношение  $\tilde{\Psi}_2$ .

На очередном этапе синтеза по всем  $i$ -м и  $j$ -м нечетким переменным ( $i \neq j$ ) определяется подмножество недоминирующих альтернатив на нечетком множестве  $\{\tilde{\Phi}, \mu_{\tilde{\Psi}_2}\}$ :

$$\mu_{\tilde{\Psi}_2}(\tilde{\varphi}_i) = 1 - \sup_{i,j} (\mu_{\tilde{\Psi}_2}(\tilde{\varphi}_j, \tilde{\varphi}_i) - \mu_{\tilde{\Psi}_2}(\tilde{\varphi}_i, \tilde{\varphi}_j)). \quad (12)$$

Исходя из выражения (12), с учетом введенных коэффициентов предпочтения  $\Omega_l$  по аналогии с нечетким отношением предпочтения  $\tilde{\Psi}_1$ , для нечеткого отношения  $\tilde{\Psi}_2$  определяются подмножества недоминирующих альтернатив  $\mu_{\tilde{\Psi}_2}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел тз}})$ ,  $\mu_{\tilde{\Psi}_2}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел из}})$ ,  $\mu_{\tilde{\Psi}_2}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел из}})$ ,  $\mu_{\tilde{\Psi}_2}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел кз}})$  и  $\mu_{\tilde{\Psi}_2}^{\text{НДА}}(\tilde{\varphi}_{\text{рел сз}})$  для соответствующих нечетких переменных  $\{\tilde{\varphi}_{\text{рел тз}}\}$ ,  $\{\tilde{\varphi}_{\text{рел из}}\}$ ,  $\{\tilde{\varphi}_{\text{рел из}}\}$ ,  $\{\tilde{\varphi}_{\text{рел кз}}\}$  и  $\{\tilde{\varphi}_{\text{рел сз}}\}$  – показателей релевантности, претендующих на включение в состав оптимальной СПК.

В итоге получаем функцию принадлежности из нечеткого множества недоминирующих альтернатив  $\mu_{\tilde{\Psi}_2}^{\text{НДА}}$ .

Так, для нашего случая в результате вычислений с использованием введенных значений индексов  $\Omega_l$  получим значения нечеткого множества недоминирующих альтернатив  $\mu_{\tilde{\Psi}_2}^{\text{НДА}}$ , например:

$$\mu_{\tilde{\Psi}_2}^{\text{НДА}} = \{0,988; 0,701; 0,603; 0,6; 0,355; 0,542\}. \quad (13)$$

На завершающем этапе синтеза оптимальной СПК РПЗП в рамках поиска альтернативы выбора показателей качества информационного поиска с максимальной степенью недоминируемости, определяется множество недоминирующих альтернатив, таких как пересечение множеств  $\mu_{\tilde{\Psi}_1}^{\text{НДА}}$  и  $\mu_{\tilde{\Psi}_2}^{\text{НДА}}$ , например, для ЛСПК релевантности РПЗП:

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{\Psi}_1}^{\text{НДА}} \cap \mu_{\tilde{\Psi}_2}^{\text{НДА}} &= \{(1; 1; 1; 1; 1) \cap (0,988; 0,701; 0,603; 0,6; 0,355; 0,542)\} = \\ &= \{(0,988; 0,701; 0,603; 0,6; 0,355; 0,542)\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Тем самым, благодаря применению корректных математических механизмов сравнения нечетких отношений предпочтения, удалось осуществить компромиссное сравнение и получить результаты сочетания (пересечения) альтернативных категорий «важности» для различных показателей релевантности информационного поиска, отобрав, в конечном итоге, наиболее значимые показатели для ЛСПК, характеризующей релевантность РПЗП на информационных ресурсах ДЦ и ЭБ. В рамках нашего примера рациональным выбором следует считать альтернативу  $\{\varphi_{\text{рел ммз}}\}$ , как получившую по итогам расчетов максимальную степень недоминируемости, наиболее близкую (в идеале – равную) к единице.

Физический смысл данного результата для нашего примера состоит в том, что оптимальный выбор (с учетом предпочтений) при формировании безыбыточного, но функционального множества (системы) показателей качества РПЗП на ресурсах современных ДЦ и ЭБ с точки зрения включения или невключения в его состав тех или иных показателей релевантности, необходимо сделать в пользу показателя  $\{\varphi_{\text{рел ммз}}\}$  – потенциальной релевантности поиска данных при мультимедийных запросах.

Иными словами, уровень соответствия результатов реализации мультимедийного запроса требованиям пользователя потенциально будет иметь в нашем случае наибольшую степень важности для оценки качества РПЗП.

Для векторных ЛСПК, характеризующих оперативность поиска, адекватность результатов различных поисковых запросов и объем (размерность) данных, которые необходимо найти в рамках различных поисковых запросов, задача синтеза элементов этих локальных систем решается аналогично.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, формально описаны этапы нового методологического подхода к решению задач синтеза избыточных СПК РПЗП на информационных ресурсах современных ДЦ и ЭБ. Представленный подход может быть использован для решения задач разработки иерархически связанных систем показателей качества, обоснования пространств их состояний и критериев оценивания качества процессов такого класса.

Предлагаемая совокупность взаимосвязанных этапов при реализации процедур синтеза оптимальной СПК РПЗП на информационных ресурсах ДЦ и ЭБ, основанная на методах нечетких отношений предпочтения, методах анализа и сравнения альтернатив, позволяет осуществить переход к комплексной и оптимальной реализации поисковых запросов и повышению качества поисковых алгоритмов в целом.

Более того, предложенный подход к синтезу оптимальной СПК позволяет устранить неопределенность (нечеткость) при формировании глобального вектора показателей существенных свойств различных процедур информационного поиска. Уточнение, реконструкция недостающих компонент СПК позволяет повысить объективность задания исходных данных для поиска и в конечном итоге повысить точность анализа качества и эффективности реализации поисковых запросов.

#### **Список источников**

1. Зуйкина, К. Л. Электронные библиотеки в России. Текущий статус и перспективы развития / К. Л. Зуйкина, Д. В. Соколова, А. В. Скалабан. – Москва : Ваш формат, 2017. – 120 с.
2. Паращук, И. Б. Особенности построения и анализа качества дата-центров как базовых элементов ИТ-инфраструктуры / И. Б. Паращук, Н. В. Михайличенко // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы IV Межрегиональной научно-практической конференции. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2018. – С. 28–29.
3. Петухов, Г. Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов / Г. Б. Петухов. – Москва : МО СССР, 1989. 660 с.
4. Терентьев, В. М. Анализ эффективности функционирования автоматизированных сетей многоканальной радиосвязи / В. М. Терентьев, Ю. В. Санин. – Санкт-Петербург : ВАС, 1992. – 80 с.
5. Терентьев, В. М. Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи / В. М. Терентьев, И. Б. Паращук – Санкт-Петербург : ВАС, 1995. – 196 с.
6. Берримен, Д. Релевантный поиск с использованием Elasticsearch и SolrPDF / Д. Берримен, Д. Тарбулл. – Москва : ДМК Пресс. 2017. – 410 с.
7. Белов В. В. Повышение pertinентности поиска в современных информационных средах / В. В. Белов, А. А. Терехов, В. И. Чистякова. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2012. – 158 с.
8. Миронов, А. Л. Соотношение релевантности и pertinентности поисковой выдачи / А. Л. Миронов, Г. В. Миронова // Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке : материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием. – Майский : ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2023. – С. 257–260.
9. Трушина, В. П. Информационные технологии многокритериального выбора альтернатив на основе нечеткого отношения предпочтения / В. П. Трушина, А. Л. Осипов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции : в 4 т. – Курск, 2015. – Т. 4. – С. 150–153.
10. Винокуров, А. С. Использование метода нечеткого отношения предпочтения для принятия оптимального решения по выбору цифрового фотоаппарата / А. С. Винокуров, И. В. Белов, Р. И. Баженов // Современная техника и технологии. – 2014. – № 11. – URL: [https:// technology.snauka.ru/2014/11/4868](https://technology.snauka.ru/2014/11/4868) (дата обращения: 30.01.2024).
11. Чернов, В. Г. Нечеткие множества. Основы теории и применения : учеб. пос. / В. Г. Чернов. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2018. – 156 с.
12. Паращук, И. Б. Нечеткие множества в задачах анализа сетей связи / И. Б. Паращук, И. П. Бобрик. – Санкт-Петербург : ВУС, 2001. – 80 с.
13. Рыжов А. П. Модели поиска информации средствами теории нечетких множеств : монография / А. П. Рыжов. – Москва : Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2004. – 96 с.
14. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой информации / С. А. Орловский. – Москва : Наука, 1986. – 208 с.
15. Панкова, Л. А. Семантический текстовый поиск, основанный на теории нечетких множеств / Л. А. Панкова, В. А. Пронина // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2013. – № 3. – С. 19–23.

16. Целых, А. Н. Метод информационного поиска на основе нечеткого сходства ситуаций / А. Н. Целых, Э. М. Котов, А. А. Целых // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 6 (155). – С. 74–78.

17. Kotenko, I. V. Decomposition and Formulation of System of Features of Harmful Information Based on Fuzzy Relationships / I. V. Kotenko, I. B. Parashchuk // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia. – IEEE Xplore Digital Library : Browse Conferences, 2019. – Vol. 8867588. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867768.

#### References

1. Zuiкина, K. L., Sokolova, D. V., Skalaban, A. V. *Electronic libraries in Russia. Current status and development prospects*. Moscow, Your format, 2017. 120 p.

2. Parashchuk, I. B., Mikhailichenko, N. V. Features of building and analyzing the quality of data centers as basic elements of IT infrastructure. *Promising directions for the development of domestic information technologies : materials of the IV Interregional scientific and practical conference*. Sevastopol, Sevastopol State University, 2018. pp. 28–29.

3. Petukhov, G. B. *Fundamentals of the theory of efficiency of purposeful processes*. Moscow, Ministry of Defense of the USSR, 1989. 660 p.

4. Terentyev, V. M., Sanin, Yu. V. *Analysis of the effectiveness of automated multichannel radio communication networks*. St. Petersburg, VAS, 1992. 80 p.

5. Terentyev, V. M., Parashchuk, I. B. *Theoretical foundations of multichannel radio communication network management*. St. Petersburg, VAS, 1995. 196 p.

6. Berryman, D., Turnbull, D. *Relevant search using Elasticsearch and SolrPDF*. Moscow, DMK Press, 2017. 410 p.

7. Belov, V. V., Terekhov, A. A., Chistyakova, V. I. *Increasing the persistence of search in modern information environments*. Moscow, Hotline-Telecom, 2012. 158 p.

8. Mironov, A. L., Mironova, G. V. Correlation of relevance and persistence of search results. *Actual problems of agroengineering in the XXI century : materials of the national scientific and practical conference with international participation*. Maysky, Belgorod State Agrarian University, 2023. pp. 257–260.

9. Trushina, V. P., Osipov, A. L. Information technologies of multi-criteria choice of alternatives based on a fuzzy preference relation. *Modern tool systems, information technologies and innovations : collection of scientific papers of the XII International Scientific and Practical Conference : in 4 vol*. Kursk: 2015, vol. 4, pp. 150–153.

10. Vinokurov, A. S., Belov, I. V., Bazhenov, R. I. Using the fuzzy preference ratio method to make the optimal decision on choosing a digital camera. *Modern equipment and technologies*, 2014, no. 11. URL: [https:// technology.snauka.ru/2014/11/4868](https://technology.snauka.ru/2014/11/4868) (accessed 30.01.2024).

11. Chernov, V. G. *Fuzzy sets. Fundamentals of theory and application : tutorial*. Vladimir, Publishing House of the All-Russian State University, 2018. 156 p.

12. Parashchuk, I. B., Bobrik, I. P. *Fuzzy sets in problems of communication network analysis*. St. Petersburg, VUS, 2001. 80 p.

13. Ryzhov, A. P. *Models of information retrieval by means of the theory of fuzzy sets : monograph*. Moscow, Publishing House of Lomonosov Moscow State University, 2004. 96 p.

14. Orlovsky, S. A. *Problems of decision-making with fuzzy information*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 208 p.

15. Pankova, L. A., Pronina, V. A. Semantic text search based on the theory of fuzzy sets. *Artificial Intelligence and Decision-making*, 2013, no. 3, pp. 19–23.

16. Tselykh, A. N., Kotov, E. M., Tselykh, A. A. Method of information search based on fuzzy similarity of situations. *Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences*, 2014, no. 6 (155). pp. 74–78.

17. Kotenko, I. V., Parashchuk, I. B. Decomposition and Formulation of System of Features of Harmful Information Based on Fuzzy Relationships. *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia*. IEEE Xplore Digital Library: Browse Conferences, 2019, vol. 8867588, pp. 1–5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867768.

Статья поступила в редакцию 06.02.2024; одобрена после рецензирования 15.02.2024; принята к публикации 16.02.2024.

The article was submitted 06.02.2024; approved after reviewing 15.02.2024; accepted for publication 16.02.2024.

УДК 004.021, 004.043, 004.4

**СОСТАВЛЕНИЕ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ  
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА  
ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ**

*Смирнова Юлия Александровна*, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,  
старший преподаватель кафедры информационных технологий, ORCID: 0000-0002-3807-5062,  
e-mail: got-22@mail.ru

*Тарабановская Екатерина Сергеевна*, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,  
студент, ORCID: 0009-0002-2507-9344, e-mail: tarabanovskaya.es@mail.ru

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

Статья рассматривает использование цифрового двойника в химии, представляющего собой виртуальное отображение реальной химической системы, а также методику его создания и применения. Проиллюстрирована сложность моделирования молекулярных систем и обоснована необходимость автоматизации этого процесса. Проведен анализ процесса возникновения молекулярных связей, и на его основе разработаны критерии составления продукционных правил, применяемых при моделировании сложных молекулярных систем. Показаны специфика составления и добавления продукционных правил в базу данных, а также особенности их использования в процессе моделирования. Кроме того, описаны программные алгоритмы формирования модели сложной молекулярной системы. Выполнена оценка эффективности автоматизированной системы в сравнении с ручной обработкой данных. Полученные результаты могут быть использованы специалистами в области химии, биологии и др.

**Ключевые слова:** алгоритм, цифровой двойник, моделирование, Z-матрица, молекулярная система, продукционное правило, база данных, атом, потенциально активный центр, геометрические параметры

*Благодарности:* исследование выполнено при поддержке Программы развития Астраханского государственного университета имени В. Н. Татищева (Приоритет – 2030).

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

*Smirnova Yulia A.*, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Senior Lecturer of the Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID: 0000-0002-3807-5062, e-mail: got-22@mail.ru

*Tarabanovskaya Ekaterina S.*, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,  
student, ORCID: 0009-0002-2507-9344, e-mail: tarabanovskaya.es@mail.ru

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

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

The article examines the use of a digital double in chemistry, which is a virtual representation of a real chemical system, as well as the methodology for its creation and application. The complexity of modeling molecular systems is illustrated and the need for automation of this process is justified. The analysis of the process of the emergence of molecular bonds has been carried out and, based on it, criteria for the compilation of production rules used in modeling complex molecular systems have been developed. The specifics of compiling and adding production rules to the database, as well as the features of their use in the modeling process, are shown. In addition, software algorithms for the formation of a complex molecular system are described. The efficiency of the automated system was evaluated in comparison with manual data processing. The results obtained can be used by specialists in the field of chemistry, biology, etc.

**Keywords:** algorithm, digital twin, modeling, Z-matrix, molecular system, production rule, database, atom, potentially active center, geometric parameters

*Acknowledgements:* this research was supported by the Astrakhan Tatishchev State University Development Program (Priority – 2030).

## Graphical annotation (Графическая аннотация)



## ВВЕДЕНИЕ

Цифровой двойник процесса взаимодействия двух молекулярных систем – это цифровая копия процесса образования водородной связи между двумя молекулярными системами. Под молекулярной системой (МС) понимается описание реальных молекул в виде  $Z$ -матрицы.  $Z$ -матрица состоит из следующих компонентов и их параметров:

- элемент системы (имя химического элемента);
- порядковый номер элемента системы;
- межатомное расстояние;
- валентный угол, образуемый между элементами системы;
- двугранный угол, образованный плоскостями.

Цифровой двойник может использоваться для моделирования различных химических процессов и явлений, таких как:

- синтез и оптимизация новых химических соединений и материалов;
- изучение структуры и свойств белков, нуклеиновых кислот, липидов и других биомолекул;
- исследование механизмов реакций, катализаторов и реакционных условий;
- прогнозирование свойств и поведения химических систем в различных условиях, например, при изменении температуры, давления и физических свойств окружающей среды.

Цифровой двойник процесса взаимодействия двух молекулярных систем позволяет моделировать образование сложных молекулярных систем (СМС). СМС – это системы, включающие в себя две молекулы, созданные благодаря образованию водородной связи между отдельными атомами этих молекул. В процессе моделирования образования СМС [2] с применением цифрового двойника возникают такие проблемы, как:

- разнообразие возможных вариантов взаимодействий МС, в связи с которым проводится продолжительный подбор геометрических параметров;
- вычислительная сложность: МС могут содержать большое количество молекул и иметь различные уровни организации, что делает обработку данных медленным и трудоемким процессом.

В связи с этим было предложено автоматизировать процесс моделирования взаимодействия двух молекулярных систем. Для этого были разработаны методики и алгоритмы перебора параметров молекулярного взаимодействия. В моменте проведения экспериментов была замечена закономерность, что ранее успешно подобранные геометрические параметры при моделировании процесса образования СМС могут быть повторно использованы для той же молекулы при моделировании взаимодействия с новой молекулой. Поэтому было принято решение создать базу знаний, на основе которой можно подбирать геометрические параметры для моделирования взаимодействия различных веществ с учетом уже имеющихся знаний об успешно образованных СМС.

Исходя из вышесказанного, был разработан алгоритм составления продукционных правил, используемых при формировании цифрового двойника процесса взаимодействия двух молекулярных систем. Полученная в результате специализированная база знаний позволит применить ретроспективный поиск по уже имеющимся данным о ранее сформированных сложных молекулярных системах, что сократит время расчетов при исследовании других молекулярных структур.

### МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Молекулярные системы имеют множество способов описания. В данной работе для описания МС используется формализованное компьютерное представление – Z-матрица [1, 4].

Z-матрица – это матрица, используемая для описания геометрии молекулы.

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  $Z_a, Z_b$  ;

$\varphi_{Z_i Z_a Z_b Z_c}$  – двугранный угол, образованный атомом  $Z_i$  и плоскостью  $Z_a, Z_b, Z_c$  .

Схематичный пример Z-матрицы представлен на рисунке 1.

$Z_a^1$						
$Z_b^1$	$a$	$R_{Z_a^1 Z_b^1}$				
$Z_c^1$	$b$	$R_{Z_a^1 Z_b^1}$	$a$	$\alpha_{Z_a^1 Z_c^1}$		
$Z_i^1$	$c$	$R_{Z_b^1 Z_c^1}$	$b$	$\alpha_{Z_b^1 Z_c^1}$	$a$	$\varphi_{Z_i^1 Z_a^1 Z_b^1}$
$Z_{d+i}^2$	$A_{pac}^1$	$R_1$	$A_{i+1}^1$	$\alpha_2$	$A_{i+2}^1$	$\varphi_1$
$Z_{e+i}^2$	$d$	$R_{Z_d^2 Z_e^2}$	$A_{pac}^1$	$\alpha_3$	$A_{i+1}^1$	$\varphi_2$
$Z_{t+i}^2$	$e$	$R_{Z_e^2 Z_t^2}$	$a$	$\alpha_{Z_d^2 Z_e^2}$	$A_{pac}^1$	$\varphi_3$
$Z_{j+i}^2$	$t$	$R_{Z_t^2 Z_j^2}$	$b$	$\alpha_{Z_e^2 Z_t^2}$	$a$	$\varphi_{Z_j^2 Z_d^2 Z_e^2}$

Рисунок 1 – Схематичное представление Z-матрицы

При моделировании взаимодействия двух молекулярных систем необходимо получить СМС, которая также должна быть описана в виде формализованного компьютерного представления. Одним из этапов моделирования образования СМС является формирование массива потенциально активных центров.

Потенциально активные центры – это атомы или группы атомов в молекуле, которые могут участвовать в химических реакциях или взаимодействовать с другими молекулами. Эти центры обладают определенной химической активностью и могут быть местом образования новых химических связей.

На основе данных двух Z-матриц образуется матрица S, где описана возможная связь между атомами в молекуле: 0 – связь не может образоваться между атомами; 1 – образование связи возможно [3].

### ПРОДУКЦИОННЫЕ ПРАВИЛА ОБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ

Для моделирования сложной молекулярной системы необходимо описание геометрических параметров устойчивого состояния [6].

Ускорить процесс моделирования можно за счет использования ранее полученной информации о подобранных параметрах. Поэтому было принято решение применить ретроспективный поиск, т. е. поиск на основе уже имеющихся данных и опыта.

Продукционные правила описывают ранее обнаруженные наборы параметров, позволившие сформировать СМС. Продукционное правило состоит из следующих параметров:

$$P = \{Z_{d+i}^2; R_{A_1^1 A_1^2}; A_{pac}^1; \alpha_{A_1^1}; A_i^1; \varphi_{Z_i^1 Z_a^1 Z_b^1}; A_j^1; A_{i+1}^1; \alpha_{A_{i+1}^2}; A_{j+1}^1; \varphi_{Z_{i+1}^1 Z_{a+1}^1 Z_{b+1}^1}; A_{i+2}^1; \varphi_{Z_{i+2}^1 Z_{a+2}^1 Z_{b+2}^1}\}, \quad (1)$$

где  $Z_{d+i}^2$  – атом молекулярной системы присоединения, имеющий водородную связь с потенциально активным центром;

$R_{A_1^1 A_1^2}$  – расстояние водородной связи;

$A_{pac}^1$  – потенциально активный центр основной молекулярной системы;

$\alpha_{A_1^1}$  – валентный угол;

$\varphi_{Z_i^1 Z_a^1 Z_b^1}$  – плоскостной угол;

$A_i^1, A_j^1$  – элементы, связанные с  $A_{pac}^1$ ;

$A_{i+1}^1, A_{j+1}^1$  – элементы, связанные с  $A_{pac}^1$ ;

$\alpha_{A_{i+1}^2}$  – валентный угол между вторым атомом МС присоединения и атомом основной МС;  
 $\varphi_{Z_{i+1}^1 Z_{a+1}^1 Z_{b+1}^1}$  – плоскостной угол между вторым атомом МС присоединения и атомами основной МС;  
 $A_{i+2}^1$  – элемент, связанный с  $A_{рас}^1$ ;  
 $\varphi_{Z_{i+2}^1 Z_{a+2}^1 Z_{b+2}^1}$  – плоскостной угол между третьим атомом МС присоединения и атомами основной МС.

#### СОСТАВЛЕНИЕ ПРАВИЛА

Рассматриваются две структуры:  $Z^1$  и  $Z^2$ .

Если относительно системы МС  $Z^1$  существует такое продукционное правило, в котором данная система является основной, то проверяются два условия:

1) являлся ли  $A_{рас}^1$  активным центром и имеет ли он водородную связь с атомом  $Z_{d+1}^2$ , рассматриваемым в МС присоединения;

2) если условие верно, то найденное продукционное правило со всеми геометрическими параметрами используется для формирования новой СМС, связи молекул  $Z^1$  и  $Z^2$ .

Для хранения продукционных правил и удобства их последующего использования применяется реляционная база данных, написанная на языке SQL.

База данных состоит из нескольких таблиц:

– молекулярные системы (MSbase): содержит id каждой простой МС, их названия, ссылки на файлы, содержащие их структуру для расчета;

– названия сложных молекулярных систем (SMS\_names): содержит id каждой СМС, id простых МС, из которых состоит сложная система, их названия и ссылка на папки, содержащие файлы структуры для расчета СМС относительно основной молекулы;

– сложные молекулярные системы (SMS\_pathes): содержит id рассматриваемой СМС, а также ссылки на файлы, содержащие их структуру для расчета;

– продукционные правила (prod\_rule): данная таблица содержит множество параметров:

id\_ms1 – код основной МС;

id\_ms2 – код МС присоединения;

str1\_atom\_from\_ms2 – атом МС присоединения, имеющий водородную связь с потенциально активным центром;

str1\_atom1\_from\_ms1 – потенциально активный центр основной МС;

str1\_atom2\_from\_ms1, – элемент, связанный с  $A_{рас}^1$ ;

str1\_atom3\_from\_ms1 – элемент, связанный с  $A_{рас}^1$ ;

str1\_hyd\_b – водородная связь;

str1\_val\_a – валентный угол между первым атомом МС присоединения и атомом основной МС;

str1\_pl\_a – плоскостной угол между первым атомом МС присоединения и атомами основной МС;

str2\_val\_a – валентный угол между вторым атомом МС присоединения и атомом основной МС;

str2\_pl\_a – плоскостной угол между вторым атомом МС присоединения и атомами основной МС;

str3\_pl\_a – плоскостной угол между вторым атомом МС присоединения и атомами основной МС;

k – коэффициент использования правила.

Связи между сущностями описаны в ER-диаграмме (рис. 2).

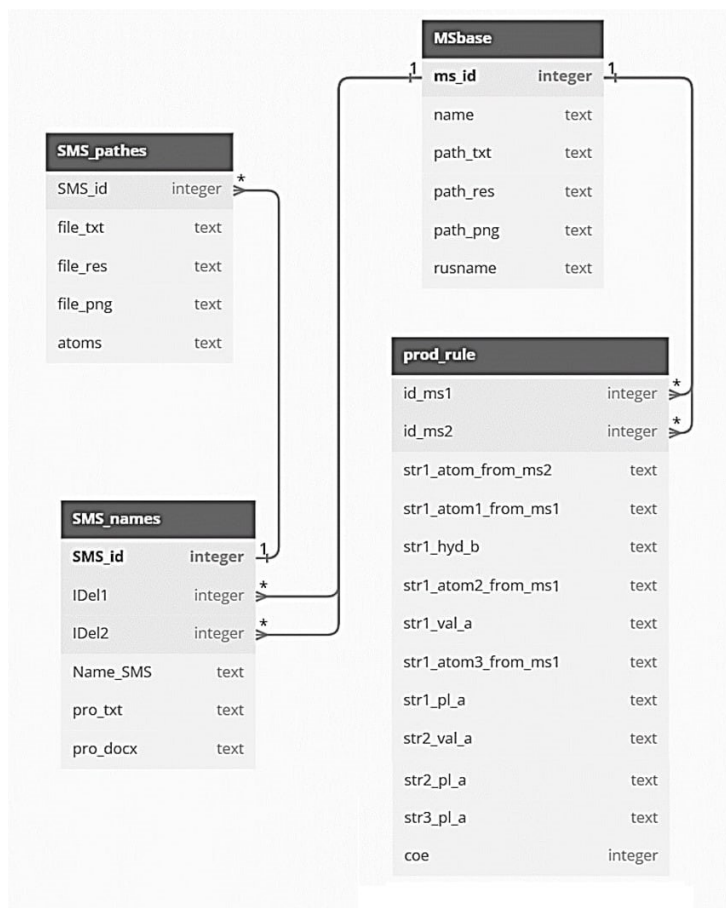


Рисунок 2 – ER-диаграмма «База данных»

### АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

#### Формирование продукционных правил

Для образования сложной молекулярной системы прежде всего необходимо занести достаточное количество продукционных правил в базу данных.

В качестве входных данных используются файлы, содержащие Z-матрицы основной МС и СМС (СМС – связанные водородной связью основная МС и МС присоединения). Данные файлы также содержат код, необходимый для расчета устойчивой структуры СМС квантово-химической программой GAMESS [1].

Словесное описание алгоритма выполнения программой функции формирования продукционного правила:

1. Начало.
2. Открытие файлов: основная МС, СМС.
3. Считывание количества строк файла со структурой МС ( $n_1$ ).
4. Считывание количества  $n$  строк файла со структурой СМС ( $n_2$ ).
5. Условие:
  - 5.1. Если  $n_2 > n_1$ , то в массив параметров продукционного правила добавляются значения каждого элемента строки.
  - 5.2. Иначе если  $n_2 > n_1 + 1$ , то в массив параметров продукционного правила добавляются значения валентного и плоскостного углов между атомами двух МС.
  - 5.3. Иначе если  $n_2 > n_1 + 2$ , то в массив параметров продукционного правила добавляются значения плоскостного угла между атомами двух МС.
6. Добавление в массив значения 0 – коэффициент правила по умолчанию.
7. Запрос в базу данных (поиск id молекулярных систем по названию МС, добавление id в массив параметров продукционного правила).
8. Поиск образованного продукционного правила в базе данных:
  - 8.1. Если МС содержится в базе данных, то:
    - 8.1.1. Если для основной МС проводился расчет с активным центром, определенном в созданном ранее правиле, и водородная связь в только что образованном и существующем правиле отличается

меньше, чем на 0,1 (единица измерения водородной связи ангстрем), то созданное правило не заносится в базу данных, вывод на экран сообщения о наличии производственного правила в базе данных.

8.2. Иначе запись элементов массива производственного правила в соответствующие столбцы таблицы базы данных.

9. Конец.

Схема работы алгоритма выполнения программой функции формирования производственного правила представлена на рисунке 3.

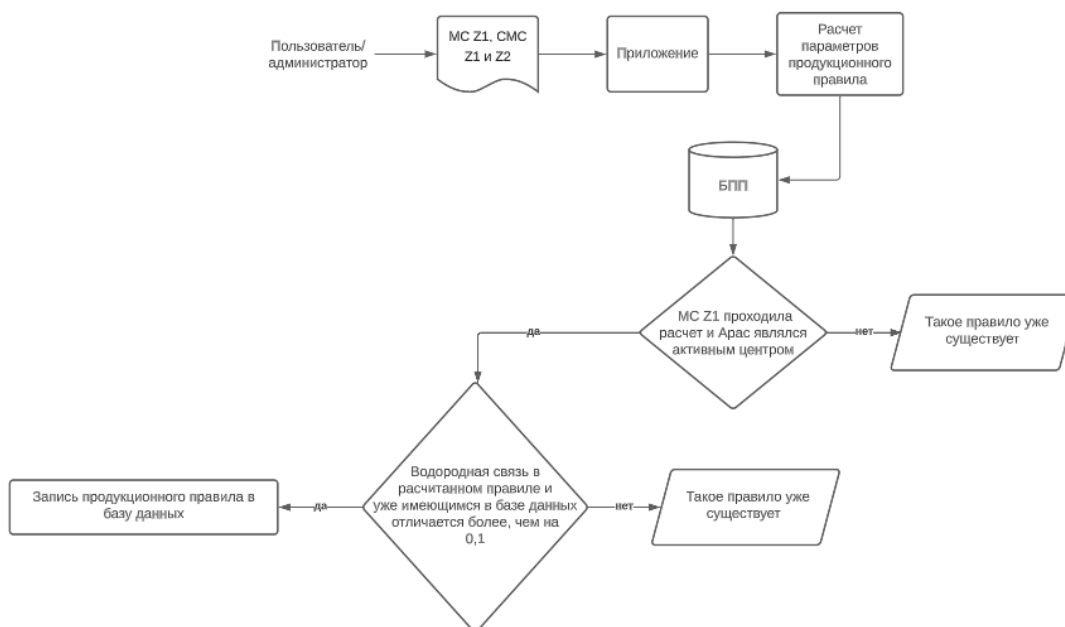


Рисунок 3 – Схема работы алгоритма работы с БПП

Словесное описание алгоритма выполнения программой функции формирования сложной молекулярной системы:

1. Начало.
2. Открытие файлов: основная МС, МС присоединения, матрица S возможных связей между молекулами.
3. Считывание строк файла основной МС.
4. Считывание строк в матрице S.
5. Условие. Если найдено первое соединение, то инициализация двух переменных – предположительно взаимодействующие молекулы: молекула основной МС, молекула МС присоединения.
6. Запрос в базу данных. Поиск id основной МС.
7. Условие:
  - 7.1. Если id основной МС найден в базе данных, то инициализация переменной, хранящей id основной МС.
  - 7.2. Иначе: Вывод в текстовое поле сообщения об отсутствии заданных МС в базе данных.
8. Поиск производственного правила по id основной МС и предположительными взаимодействующими молекулами:
  - 8.1. Условие. Если правило найдено, то:
    - 8.1.1. В отдельный массив добавляется производственное правило.
    - 8.1.2. В текстовое поле программы, не учитывая последнюю строку – \$END, записывается содержимое файла с основной МС.
    - 8.1.3. По соответствующим индексам параметров производственного правила и увеличением номеров атомов на число – размер основной молекулы – записывается содержимое МС присоединения.
    - 8.1.4. В электронный текстовый файл формата .txt добавляется полученное в текстовом поле.
    - 8.1.5. Проверка программой пакета вычислений квантовой химии – GAMESS.
    - 8.1.6. Поиск ключевой строки «...END OF GEOMETRY SEARCH...».
    - 8.1.7. Условие. Если строка найдена, то вывод в текстовое поле сообщения об успешном расчете СМС. Иначе: Вывод в текстовое поле сообщения о неудачном расчете СМС.

8.2. Иначе: Вывод на экран сообщения об отсутствии подходящего производственного правила в базе данных.

8. Конец.

Схема алгоритма выполнения программой функции формирования сложной молекулярной системы представлена на рисунке 4.

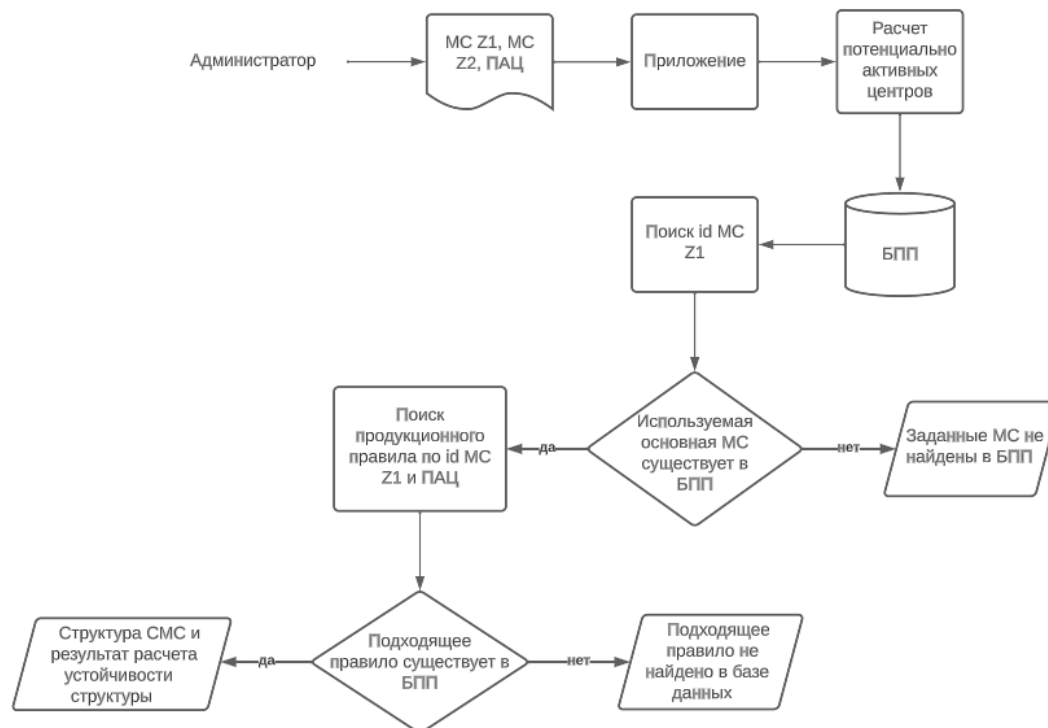


Рисунок 4 – Схема алгоритма создания СМС

### ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Для осуществления процесса моделирования СМС нам необходимы три файла формата .txt, содержащие следующую информацию: основная МС, МС присоединения, матрица S возможных связей между молекулами.

При ручной обработке также потребуется наличие папки, содержащей предыдущие расчеты относительно основной МС. Будем считать, что расположение всех необходимых объектов известно для наличия быстрого доступа к данным.

В данном эксперименте используются МС аланина как основной системы и серы как системы присоединения.

Формирование сложной молекулярной системы ручным способом:

Так как расположение нужных файлов известно по условиям опыта, начинается отсчет времени процесса.

Открыв файл с матрицей S, определяется, какое соединение возможно между молекулами. В рассматриваемом случае видно, что атом Н молекулы серы может соединиться водородной связью с четвертым атомом О молекулы аланина (рис. 5). Также заранее подсчитывается количество атомов в молекуле аланина, это необходимо в дальнейшем. Атомов в молекуле аланина 13.

Создается новый текстовый файл, содержащий специализированный программный код GAMESS, структуру основной МС, структуру МС присоединения, в которой отсутствуют необходимые геометрические параметры.

По горизонтали молекула из файла sera.txt  
По вертикали молекула из файла alanin.txt

	H	S	H
C	0	0	0
C	0	0	0
C	0	0	0
O	1	0	1
O	1	0	1
N	1	0	1
H	0	1	0
H	0	1	0
H	0	1	0
H	0	1	0
H	0	1	0
H	0	1	0
H	0	1	0

Возможных водородных связей 13  
Плотность матрицы 0.333'

Рисунок 5 – Матрица S возможных связей

В структуре МС присоединения нужно изменить порядковые номера атомов, чтобы сохранить нумерацию в соответствии с основной МС. Для этого открываем папку с данными о соединении аланина с другими системами в качестве основной МС. В названиях файлов папки содержатся данные о соединении МС. Необходимо открыть файл, содержащий в названии «...O4...», так как рассматривается соединение с четвертым атомом молекулы аланина.

Затем в файле со структурой СМС находится 14 атом сложной системы, он же является первым атомом в структуре МС присоединения – этот атом связан водородной связью с атомом основной МС. Первые три атома МС присоединения имеют необходимые геометрические параметры – продукционное правило (рис. 6).

H14	4	1.8461792	3	135.9451160	2	17.1605254	0
C15	14	1.1124786	4	174.4684942	3	138.8587155	0
C16	15	1.3854719	14	119.9272167	4	94.1170677	0

Рисунок 6 – Атомы в структуре Z-матрицы

Копируются элементы строк, содержащих необходимые геометрические параметры, и они записываются в наш ранее созданный файл на соответствующие позиции (рис. 7).

Далее необходимо изменить содержание файла «program.bat», который указывает вычислительной программе GAMESS путь к файлу (рис. 8).

После сохранения файла «program.bat» пользователь запускает саму квантово-вычислительную программу, в результате которой в папке с программой появляется файл «alanin\_sera.res». Открывается файл, и с помощью поисковой строки производится поиск ключевой строки «...END OF GEOMETRY SEARCH...», которая свидетельствует об успешном расчете СМС, если строка не найдена, расчет на устойчивость системы прошел неудачно.

На данном моменте отчет времени процесса завершен. В результате затрачиваемое время на процесс равно 4 минуты и 35 секунд  $\approx 4,58$  минут.

```

$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=600 $END
$BASIS GBASIS=PM3 $END
$GUESS GUESS=HUCKEL $END
$SCRF DIELEC=80 RADIUS=10 $END
$DATA
Structure: Serovodorod // Method PM3
C1
C1
C2 1 1.5224070
C3 2 1.5258740 1 112.4580200
O4 3 1.2190130 2 126.8684980 1 -148.2530490 0
O5 3 1.3495810 2 117.4878190 1 31.6881620 0
N6 2 1.4897390 1 110.8938440 3 119.6355420 0
H7 1 1.0988410 2 111.1759750 3 174.4272700 0
H8 1 1.0978210 2 110.8195280 3 55.1952240 0
H9 1 1.0987200 2 112.5138840 3 -65.0395510 0
H10 2 1.1230240 1 108.2635890 7 56.8686480 0
H11 5 0.9526410 3 109.5930080 2 178.1442600 0
H12 6 0.9974070 2 109.5710490 1 165.6129000 0
H13 6 0.9976590 2 109.3453410 1 45.2978140 0
H14 4 1.8461792 3 135.9451160 2 17.1605254 0
S15 14 1.2904060 4 174.4684942 3 138.8587155 0
H16 15 1.2903920 14 93.5417 4 94.1170677 0
$END
    
```

Рисунок 7 – Сформированная СМС

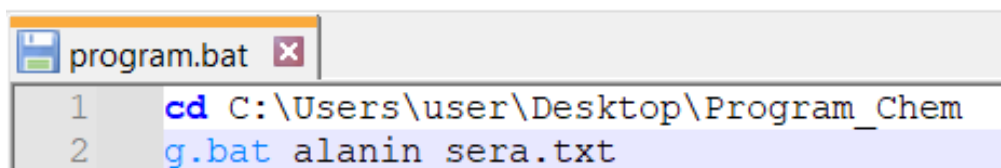


Рисунок 8 – Содержание файла «program.bat»

Формирование СМС автоматизированной системой:

В результате исследования на основе созданных алгоритмов с использованием специальных программ и дополнительных вычислений было разработано программное обеспечение «Система поддержки принятия решений геометрических параметров для составления сложных молекулярных систем».

Для работы с программой необходимо запустить программу, зайти под логином и паролем администратора/обычного пользователя (если пользователь не зарегистрирован, необходимо пройти регистрацию) (рис. 9). Считается, что пользователь уже зарегистрирован в системе. На моменте запуска программы начинается отсчет времени в программе, затрачиваемого на совершение процедуры.

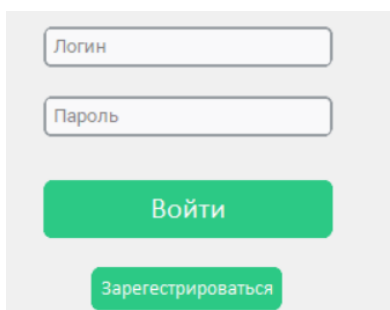


Рисунок 9 – Окно авторизации

Если пользователь не является администратором, то после завершения авторизации сразу открывается окно для реализации функции формирования СМС, иначе администратору необходимо по нажатию на соответствующую кнопку перейти в окно формирования СМС (рис. 10)

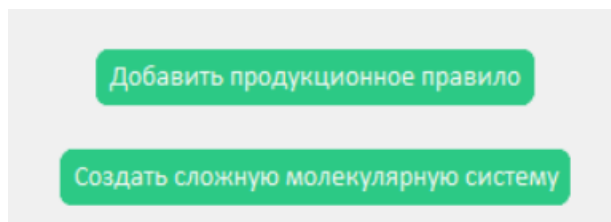


Рисунок 10 – Окно панели администратора

В окне создания СМС необходимо погрузить три файла (описанные ранее, содержащие: информацию о МС основной, МС присоединения и ПАЦ), после чего программа выполняет обработку файлов, находит подходящее производственное правило в базе данных и на его основе формирует СМС, записывая ее структуру в отдельный файл формата txt. Затем данный файл отправляется на обработку программой GAMESS, которая проводит квантово-химический расчет на устойчивость системы, а результат, полученный в ходе обработки данных, пользователь может увидеть в текстовом поле окна программы (рис. 11). На данном моменте отсчет времени считается законченным.

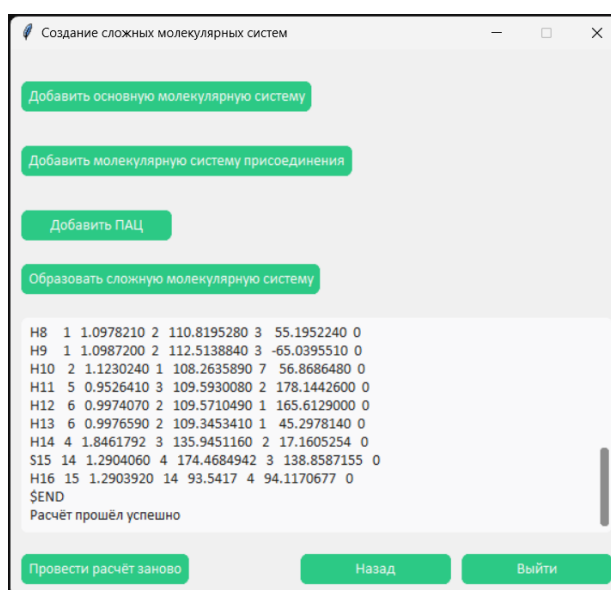


Рисунок 11 – Окно формирования СМС

В итоге на реализацию формирования СМС с помощью автоматизированной системы ушло  $\approx 24$  секунды, что равняется 0,4 минуты (рис. 12), что в 11,45 раз меньше, чем при ручной обработке, что доказывает эффективность автоматизированной системы.

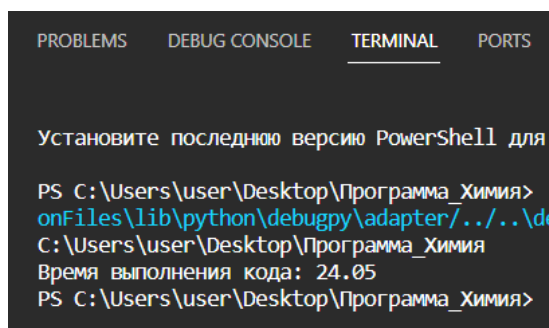


Рисунок 12 – Вывод расчета времени процесса

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлен алгоритм составления производственных правил, используемых при формировании цифрового двойника процесса взаимодействия двух молекулярных систем, основанный на ретроспективном поиске.

Практическая значимость полученных результатов заключается в эффективном практическом применении разработанного алгоритма в реализацию программного обеспечения.

Данный алгоритм и разработанный на ее основе программный комплекс можно использовать как один из этапов при поиске активных центров межмолекулярных взаимодействий.

#### Список источников

1. Смирнова, Ю. А. Разработка алгоритма и метода трансформации записи атомно-молекулярных систем / Ю. А. Смирнова, Л. И. Головацкая // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 2 (58). – С. 61–67. – EDN PDIWVT.
2. Смирнова, Ю. А. Алгоритмы поиска активных центров межмолекулярного взаимодействия / Ю. А. Смирнова, Л. И. Жарких // Вестник Технологического университета. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 104–111. – EDN NEKXAJ.
3. 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.
4. Игнатов, С. К. Квантово-химическое моделирование атомно-молекулярных процессов : учебное пособие / С. К. Игнатов. – Нижний Новгород, 2019. – 79 с.
5. Программа Gamess. The General Atomic and Molecular Electronic Structure System (GAMESS) is a general ab initio quantum chemistry package. – URL: [www.msg.chem.iastate.edu/gamess/index.html](http://www.msg.chem.iastate.edu/gamess/index.html).
6. Смирнова, Ю. А. Особенности программной реализации методики трансформации молекулярных систем / Ю. А. Смирнова, А. Н. Марьенков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 4, № 12.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614450 Российская Федерация. ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ «TFinG» ; № 2022613564 ; заявл. 15.03.2022 ; опубл. 22.03.2022 / Ю. А. Смирнова, Л. И. Головацкая ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта». – EDN CDZIPC.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669622 Российская Федерация. Система поддержки принятия решений геометрических параметров для составления сложных молекулярных систем ; № 2023668546 ; заявл. 06.09.2023 ; опубл. 18.09.2023 / Ю. А. Смирнова, А. Н. Марьенков, Е. С. Тарабановская. – EDN MSGPMR.

#### References

1. Smirnova, Yu. A., Golovatskaya, L. I. Development of an algorithm and method for transforming the recording of atomic-molecular systems. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2022, no. 2 (58), pp. 61–67. EDN PDIWVT.
2. Smirnova, Yu. A., Zharkikh, L. I. Algorithms for searching for active centers of intermolecular interaction. *Bulletin of the Technological University*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 104–111. EDN NEKXAJ.
3. Taraskin, D. V., L. I. Zharkikh Structure of software for identifying potential active centers between two molecules. *Bulletin of the Technological University*, 2019, vol. 22, no. 12, pp. 117–121.
4. Ignatov, S. K. *Quantum-chemical modeling of atomic-molecular processes : textbook*. Nizhny Novgorod, 2019. 79 p.
5. *Gamess program. The General Atomic and Molecular Electronic Structure System (GAMESS) is a general ab initio quantum chemistry package*. URL: [www.msg.chem.iastate.edu/gamess/index.html](http://www.msg.chem.iastate.edu/gamess/index.html).
6. Smirnova, Yu. A., Maryenkov, A. N. Features of software implementation of the methodology for transforming molecular systems. *Modeling, optimization and information technologies*, 2023, vol. 4, no. 12.
7. Smirnova, Yu. A., Golovatskaya, L. I. *Certificate of state registration of the computer program no. 2022614450 Russian Federation. COMPUTER PROGRAM “TFinG” ; no. 2022613564 ; application 03/15/2022 ; publ. 03/22/2022 ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Volga State University of Water Transport”*. EDN CDZIPC.
8. Smirnova, Yu. A. Maryenkov, A. N., Tarabanovskaya, E. S. *Certificate of state registration of the computer program no. 2023669622 Russian Federation. Geometric decision support system for composing complex molecular systems ; no. 2023668546 ; application 09/06/2023 ; publ. 09.18.2023*. EDN MSGPMR.

Статья поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 14.02.2024; принята к публикации 15.02.2024.

The article was submitted 12.02.2024; approved after reviewing 14.02.2024; accepted for publication 15.02.2024.

УДК 004.722.25:004.738.2

### ГИБКАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ «УМНЫЙ ДОМ»

**Кузнецов Михаил Андреевич**, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

кандидат технических наук, ORCID: 0000-0001-5044-1427, e-mail: mara122@mail.ru

**Земцов Андрей Николаевич**, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

кандидат технических наук, ORCID: 0000-0001-6430-3615, e-mail: azemtsow@mail.ru

**Ступницкий Павел Сергеевич**, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

магистрант, ORCID: 0009-0007-6183-2045, e-mail: p.stupnitskiy@gmail.com

**Попов Виктор Константинович**, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

магистрант, ORCID: 0009-0008-4050-9123, e-mail: vityapopov98@yandex.ru

В статье производится краткий обзор существующих платформ для создания умного дома, описывается функциональность каждой платформы, их совместимость с устройствами и возможности управления умным домом через мобильные приложения и голосовые команды. Рассматриваются особенности построения гибкой сетевой архитектуры и устройство приватного облачного сервера. Приведен пример построения гибкой архитектуры умного дома, позволяющей управлять различными устройствами в доме с помощью единого интерфейса, обеспечивая максимальный комфорт и удобство для пользователя. Также доказывается важность выбора открытых стандартов и протоколов, которые обеспечивают совместимость устройств и будущую расширяемость системы.

**Ключевые слова:** умный дом, Amazon Alexa, Apple HomeKit, Home Assistant, приватный облачный сервер

### FLEXIBLE SMART HOME ARCHITECTURE

**Kuznetsov Mikhail A.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-5044-1427, e-mail: mara122@mail.ru

**Zemtsov Andrey N.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-6430-3615, e-mail: azemtsow@mail.ru

**Stupnitsky Pavel S.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

undergraduate student, ORCID: 0009-0007-6183-2045, e-mail: p.stupnitskiy@gmail.com

**Popov Viktor K.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

undergraduate student, ORCID: 0009-0008-4050-9123, e-mail: vityapopov98@yandex.ru

The article provides a brief overview of smart home platforms, features of building a flexible architecture in this area and the peculiarity of devices for the private cloud server. The analysis of various smart home platforms was carried out, the functionality of each platform, their compatibility with devices and the possibilities of controlling the smart home through applications and voice commands were described. The features of building a flexible smart home architecture are described, which allows you to control various devices in the house using a single interface, providing maximum comfort and convenience for the user. It also describes the importance of choosing open standards and protocols, which ensures device compatibility and future extensibility of the system.

**Keywords:** smart home, Amazon Alexa, Apple Home Kit, Home Assistant, private cloud server

Graphical annotation (Графическая аннотация)



## ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом все больше людей становятся пользователями систем «Умный дом». Это обусловлено значительным упрощением рутинных бытовых задач. Разработчики умных домов подразумевают комплексный подход, основанный на проектировании, настройке и запуске под ключ готовых решений. В целях упрощения таких задач они ориентируются на комплектующие определенных брендов, а также разрабатывают проприетарные стандарты. Все это ускоряет проектирование и запуск систем, однако накладывает ряд существенных ограничений. В первую очередь это касается сокращения множества доступных комплектующих при выборе конкретного проектного решения. Только устройства определенных брендов, обладающие требуемым интерфейсом, могут быть подключены к системе. Из этого следует определенная монополизация рынка устройств, что приводит к повышению их стоимости и, соответственно, всей системы в целом. Также возникают проблемы с проектированием некоторых специальных задач. Например, если пользователю требуется реализовать автоматическое управление климатическими устройствами в доме и похожими задачами для теплицы на приусадебном участке, то требуется реализовать две независимые системы, так как для теплицы требуется управление системой полива, которая не предусмотрена в уже имеющемся решении системы «Умный дом». Таким образом, подключение к умному дому специфических устройств, не заложенных изначально разработчиками в ее экосистему, становится проблематичным. Возникает задача комплексной поддержки разноплановых устройств от различных производителей и с разными протоколами взаимодействия, которыми необходимо управлять в рамках одной системы.

Решение данной проблемы видится в реализации сервера умного дома, который обеспечивает управление устройствами от разных производителей и позволяет пользователям настраивать их работу на основе одной платформы. Это решение не только упрощает жизнь конечным пользователям, но также позволяет создать энергоэффективную, экономичную систему, уменьшить нагрузку на окружающую среду и обеспечивать построение системы «Умный дом» с более низкой стоимостью. Важно при этом обеспечить приемлемую безопасность такого комплексного интегрированного решения.

В результате разработка и внедрение сервера умного дома, поддерживающего работу с устройствами разных брендов, является одним из ключевых направлений для исследований и развития в области технологий умного дома.

## КРАТКИЙ ОБЗОР ПЛАТФОРМ УМНОГО ДОМА

Задача комплексного управления устройствами разных производителей решается несколькими платформами. Наиболее популярные из них следующие: Amazon Alexa, Apple HomeKit, Home Assistant.

Amazon Alexa – это одна из популярных платформ управления умным домом от компании Amazon. Она поддерживает работу с устройствами от более чем 4 000 производителей [1]. Apple HomeKit – платформа управления умным домом от Apple Inc. Она также позволяет подключать устройства разных производителей [2]. Обе платформы поддерживают управление устройствами таких известных брендов, как Philips Hue, Nest, Samsung SmartThings и множества других. Home

Assistant – это одна из самых популярных систем организации, автоматизации и управления устройствами умного дома и интернета вещей от большого количества различных брендов. Архитектура Home Assistant представлена на рисунке 1 [3].

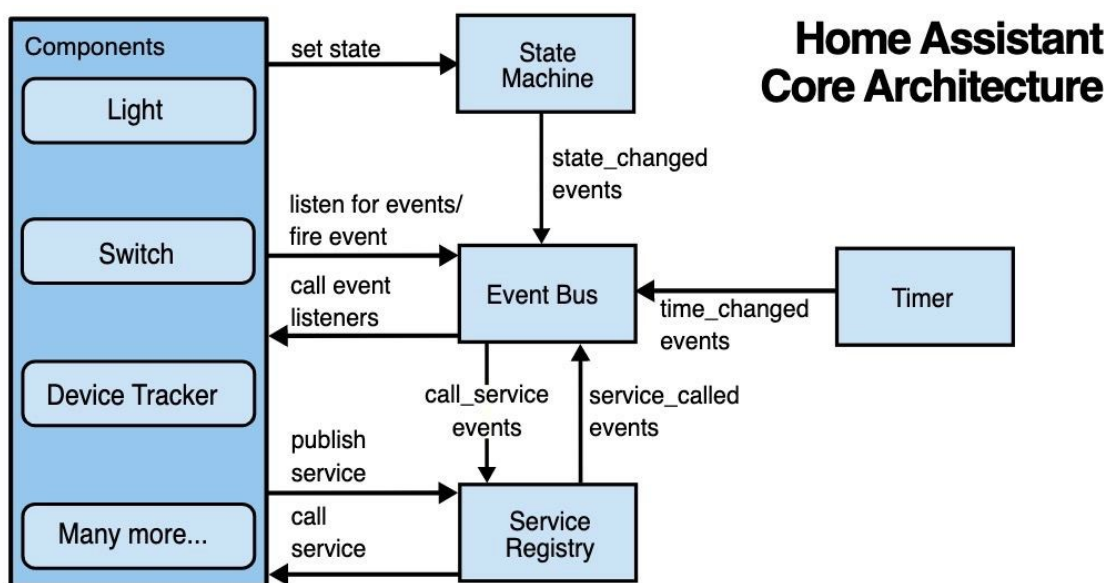


Рисунок 1 – Архитектура Home Assistant для управления светом

Если архитектуры Amazon Alexa и Apple Home Kit ориентированы на использование внешнего по отношению к локальной сети дома сервера, то Home Assistant позволяет установить сервер локально, что решает множество проблем с безопасностью, но в то же время требует, чтобы все устройства умного дома располагались в одной локальной сети. В некоторых случаях обход этого требования является сложной задачей.

Home Assistant работает на основе поддержки всемирного сообщества мастеров и энтузиастов DIY. Платформа подходит для работы на Raspberry Pi или любом другом локальном сервере, что позволяет управлять устройствами умного дома от разных брендов (рис. 2) [4]. Система построена с использованием модульного подхода, поэтому можно легко реализовать поддержку новых устройств или сценариев управления [5]. Сам сервер написан на языке программирования Python и имеет открытый исходный код.

Фактически имеющиеся платформы предлагают два варианта решения: использовать облачную проприетарную платформу с постоянным подключением к интернету локальной сети с умными устройствами или многофункциональный мощный конструктор на базе локального сервера, расположенного внутри сети.

Для реализации более гибких возможностей напрашивается компромиссный вариант архитектуры с распределением функций на два сервера: облачный приватный сервер, позволяющий управлять устройствами, расположенными в нескольких подсетях, и локальный сервер, в задачи которого входит управление устройствами внутри локальной сети.

С точки зрения особенностей реализации некоторых функций данное разделение обосновано. Например, управление дверью гаража, окнами для проветривания подсобных помещений загородного дома или дистанционное видеонаблюдение за комнатами предполагает подключение извне локальной сети. В свою очередь управление устройствами, непосредственно взаимодействующими с человеком, такими как бойлер, климатическая установка и освещение, по большей части производится через локальную сеть. Реализация взаимодействия через локальную сеть обеспечивает базовый уровень безопасности без существенной траты времени на ее настройку, так как внутри локальной сети действуют определенные политики, обеспечивающие достаточный уровень защиты от перехвата и подмены трафика.

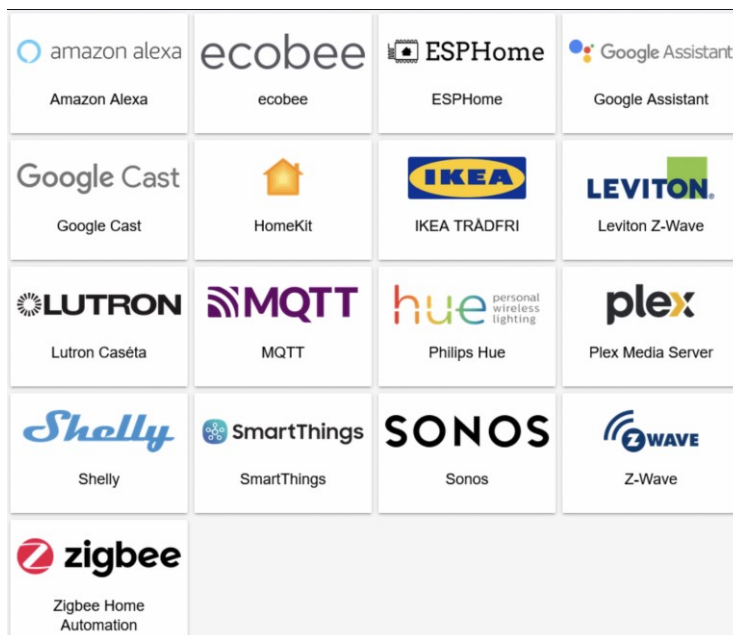


Рисунок 2 – Интеграции Home Assistant с устройствами разных брендов

Разделив функции и правила управления устройствами из локальной сети и из глобальной сети Интернет для двух серверов, мы получим возможность гибкой настройки устройств, прав пользователей и независимость управления внутренними устройствами от подключения к интернету. В такой гибкой архитектуре особое внимание уделяется приватному облачному серверу. В его задачи входит проксирование управления устройствами внутри локальной вычислительной сети. Кроме того, есть возможность полной реализации управления устройствами через приватный облачный сервер [6]. В таком случае локальный сервер отсутствует, и архитектура платформы становится аналогом представленных выше проприетарных облачных платформ.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики серверов

	Приватный облачный сервер	Amazon Alexa	Apple HomeKit	Home Assistant
Установка (простая/сложная)	простая	простая	простая	сложная
Сложность интерфейса (просто/норма/сложно)	просто	норма	просто	сложно
Поддерживаемые устройства (многие/ограничено)	ограничено*	многие	многие	многие
Безопасность (высокая/базовая)	базовая	базовая	высокая	базовая
Расширение памяти (возможно/запрещено)	возможно	возможно	запрещено	возможно
Ограничение функций (есть/нет)	нет	есть	есть	нет
Поддержка сценариев управления (есть/нет)	есть	есть	есть	есть
Каналы связи	Wi-Fi (Ethernet), Bluetooth	Wi-Fi (Ethernet), Bluetooth	Wi-Fi (Ethernet), Bluetooth	Wi-Fi (Ethernet), Bluetooth, Zigbee
Базовая цена сервера (рубли)	3000	19990	22000	11000

\* На текущий момент приватный облачный сервер имеет небольшой спектр поддерживаемых устройств, в будущем планируется расширить его.

В сравнительной таблице показаны варианты реализации умного дома на разных платформах. В случае построения умного дома на платформе облачного частного сервера получается дешевый вариант для пользователя. Реализация облачного сервера на основе модульного принципа позволяет реализовать возможности, подобные Home Assistant.

Если добавить к архитектуре локальный сервер, то независимость работы умного дома от сети интернет повышает надежность его функционирования с потерей некоторых функциональных возможностей в случае отключения от сети Интернет (или возникновения сбоев работы интернет-канала).

### **ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГИБКОЙ АРХИТЕКТУРЫ УМНОГО ДОМА**

Умный дом на базе частного облачного сервера может строиться на основе двух архитектур. Они отличаются способом хранения данных, расположением базы данных и каналами управления устройствами умного дома. Рассмотрим каждую архитектуру подробно.

**Первая архитектура** системы умного дома базируется на двух видах серверов: облачного и одного или нескольких локальных. Архитектуру составляет следующие компоненты (рис. 3):

- пользовательское приложение – консоль управления;
- сегмент интернета:
  - ✓ облачный частный сервер;
  - ✓ сервер подключения устройств (mqtt брокер);
  - ✓ учетный сервер;
  - ✓ платформы управления устройствами разных брендов;
- сегмент локальной сети:
  - ✓ локальный сервер;
  - ✓ устройства умного дома, подключенные к локальным серверам;
  - ✓ устройства умного дома с проприетарными интерфейсами от разных брендов, подключенные к собственным платформам управления;
  - ✓ база данных (OpenSearch и OpenSearch Dashboards).

Приложение – это клиентская программа на базе мобильного или web-приложения для авторизации и подключения к частному облачному серверу. Приложение взаимодействует с помощью HTTPS-запросов (с использованием REST API) с частным облачным сервером, а также мостом MQTT для отслеживания в реальном времени происходящих событий на устройствах. Также приложение позволяет дистанционно управлять устройствами умного дома. MQTT-мост, реализованный на основе частного облачного сервера, передает информацию о текущем состоянии устройств умного дома из локальной сети.

Сервер подключения устройств (MQTT-брокер) – это сервер, с помощью которого можно добавить новое устройство к умному дому [8].

Учетный сервер – это сервер, который предназначен для регистрации и авторизации административной учетной записи (УЗ), где данная УЗ является единственной для каждого частного облачного сервера.

Платформы управления устройствами разных брендов – это приложения библиотеки/платформы, с помощью которых можно передать различные команды и получить необходимую информацию с устройств умного дома, имеющего проприетарный интерфейс. Это те устройства, управление которыми через локальный сервер невозможно осуществить в силу различных причин, но в то же время существует простой вариант использования их через внешние платформы.

Локальный сервер устанавливается непосредственно в помещение пользователя (частный дом, офис, цех и др.). Если существует несколько локальных сетей, в которых устанавливаются устройства умного дома, то происходит деление на зоны управления. Согласно сетевой архитектуре получается по одному локальному серверу в каждую подсеть. Подсети формируют относительно независимые зоны управления. Для удобного анализа и безопасного хранения данных, приходящих с устройств умного дома, используется база данных (БД) OpenSearch. БД также устанавливается локально в помещении. Благодаря такому принципу организации хранения информации данные пользователя будут защищены от доступа из интернета. Возможность обращения к данным имеют только пользователи одного умного дома.

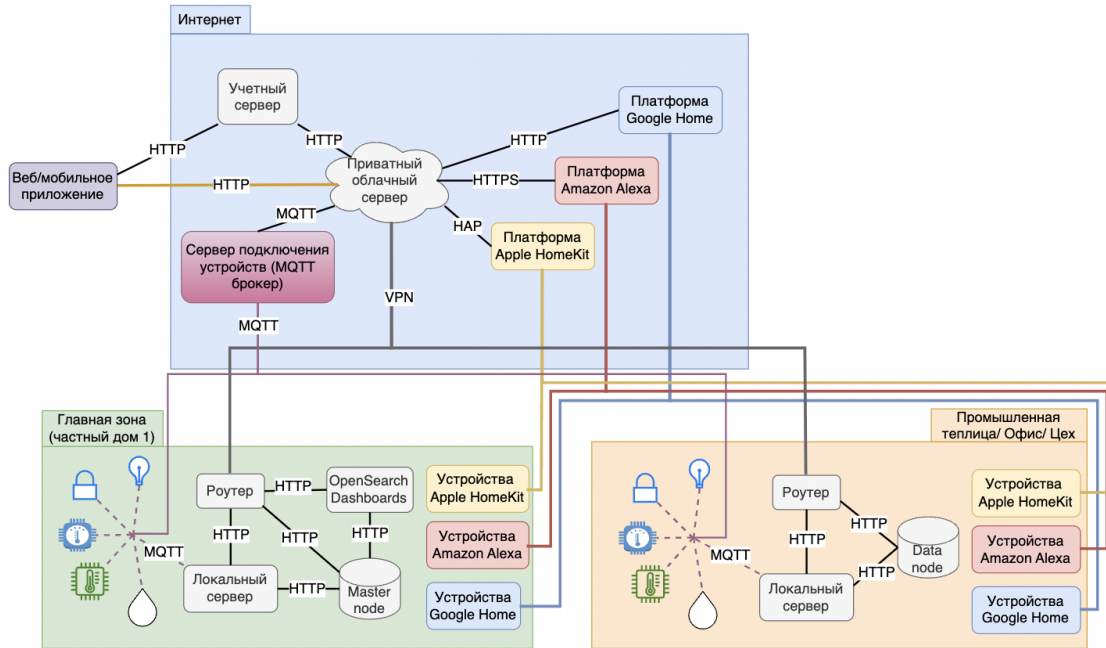


Рисунок 3 – Архитектура умного дома с локальными серверами

Приватный облачный сервер к каждой зоне умного дома подключается через VPN. Логика управления устройствами на серверах реализуется с помощью Golang [7]. Выбор этого языка обусловлен поддержкой многопоточности, которая требуется для параллельного управления несколькими устройствами. В каждой экосистеме умного дома присутствует главная зона. Есть возможность организовать большее количество зон. Новые зоны считаются второстепенными, т. е. подчиненными главной зоне. Главная зона – это зона, на которой установлен локальный сервер, OpenSearch с ролью “master, data, ingest” (управляет и хранит данные) и OpenSearch Dashboards, с помощью которого можно посмотреть и проанализировать данные со всех зон. Второстепенная зона – это зона, на которой установлен локальный сервер и OpenSearch с ролью “data, ingest” (только хранит данные). Для удобного и корректного подключения узлов кластера также настраивается домен для каждой зоны.

Взаимосвязь приватного облачного сервера с БД и локальным сервером представлена на рисунке 4.

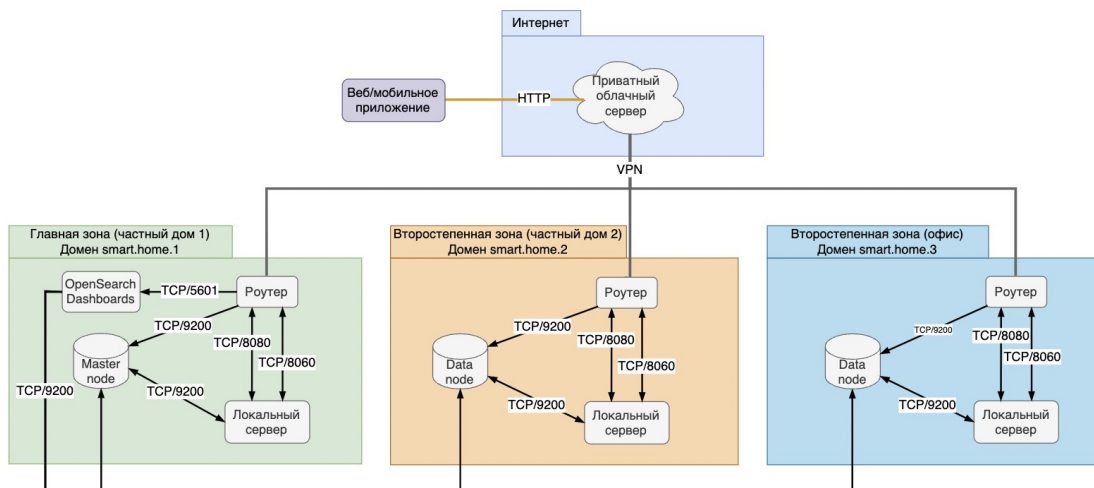


Рисунок 4 – Взаимосвязь приватного облачного сервера с БД и локальным сервером

Если пользователь умного дома не хочет переплачивать за установку и тратить время на настройку множества локальных серверов и связанных с ним баз данных, то архитектура будет немного упрощаться.

**Вторая архитектура** представляет собой более простую схему (рис. 5). Во втором варианте архитектуры отсутствует избыточность. За счет этого первоначальные вложения в систему минимизируются, но при этом требуется постоянная коммуникация устройств с облачным сервером через глобальную сеть Интернет. Это уменьшает надежность работы системы и делает ее работу полностью зависимой от функционирования внешней глобальной сети.

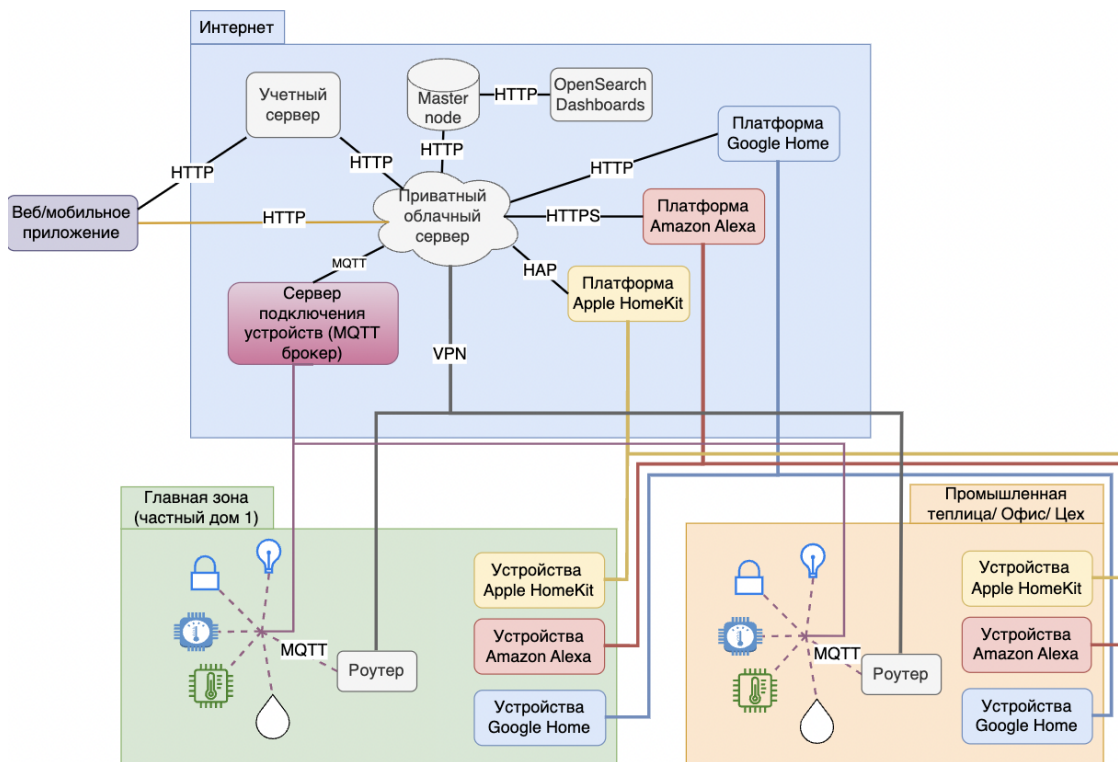


Рисунок 5 – Архитектура умного дома с единственным частным облачным сервером

В локальных подсетях отсутствуют локальные сервера и базы данных. Управление всеми устройствами осуществляет частный облачный сервер через глобальную сеть. Также выделена централизованная база данных (OpenSearch и OpenSearch Dashboards), которая вынесена в облачное хранилище. Таким образом получаем такую структуру узлов:

- пользовательское приложение – консоль управления;
- сегмент интернета:
- ✓ облачный частный сервер;
- ✓ сервер подключения устройств (MQTT-брокер);
- ✓ учетный сервер;
- ✓ платформы управления устройствами разных брендов;
- ✓ база данных (OpenSearch и OpenSearch Dashboards);
- локальное помещение:
- ✓ устройства умного дома с поддерживаемыми частным облачным сервером интерфейсами;
- ✓ устройства умного дома с проприетарными интерфейсами от разных брендов, подключенные к собственным платформам управления.

#### УСТРОЙСТВО ЧАСТНОГО ОБЛАЧНОГО СЕРВЕРА

Частный облачный сервер – важнейшая часть системы умного дома. Он является центральным звеном как для первого, так и для второго варианта архитектуры. Устройство частного облачного сервера представлено на рисунке 6. Важными элементами внутреннего устройства частного облачного сервера являются:

- MQTT-коннектор, который служит для получения информации о текущем состоянии устройств умного дома от MQTT-брокера;
- HTTP-коннектор, который позволяет реализовать обертку HTTP-подключения для внутренних интерфейсов управления умным домом;
- конвертер метрик, который служит для извлечения необходимых метрик, полученных от платформ разных брендов, и конвертирования во внутреннее представление моделей устройств.

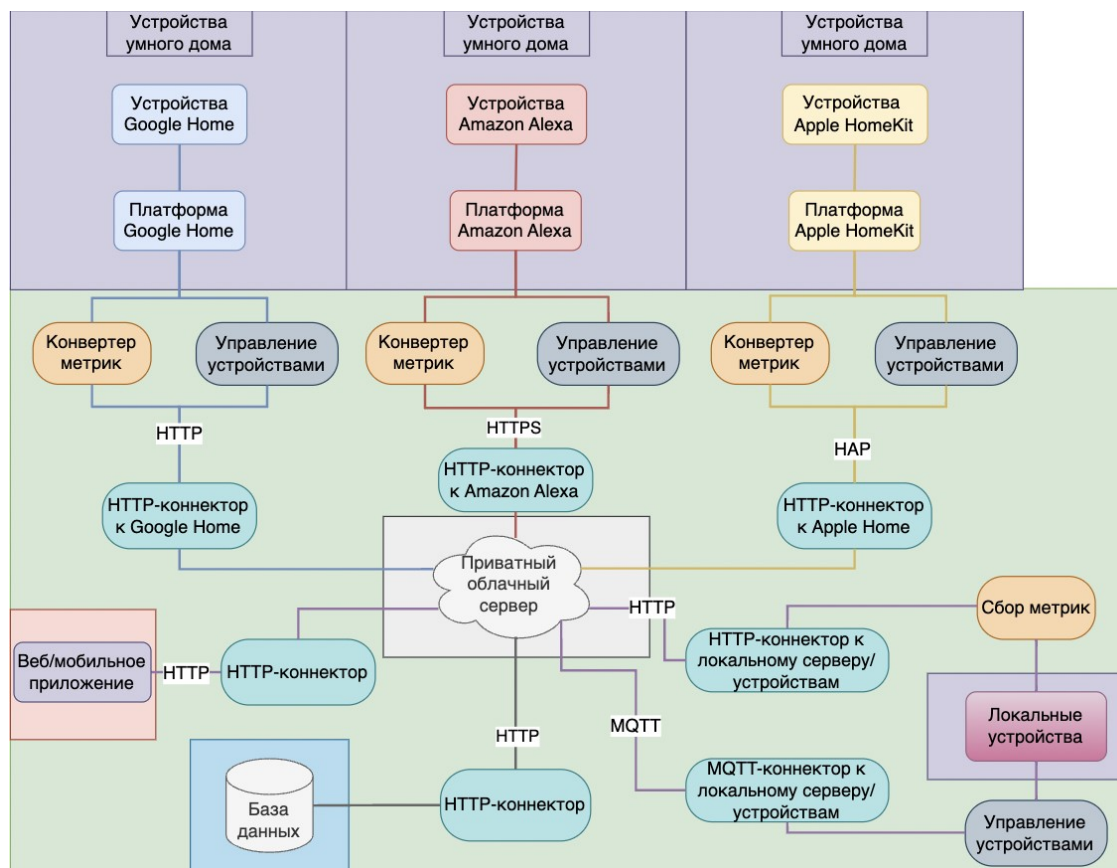


Рисунок 6 – Структура частного облачного сервера

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная гибкая архитектура облачного сервера позволяет владельцам устройств умного дома эффективно настраивать и управлять различными устройствами от разных брендов, обладающих отличающимися протоколами взаимодействия. Возможность модификации архитектуры лежит в особенности устройства частного облачного сервера. В зависимости от предпочтения пользователя он может организовывать непосредственное управление устройствами или же делегировать эту задачу локальному серверу. Таким образом осуществляется баланс между надежностью, независимостью и безопасностью функционирования нескольких зон умного дома.

## Список источников

1. Alexa Smart Home // amazon.com. – URL: [https://www.amazon.com/gp/help/customer/display.html?ref=hp\\_gcs\\_csd\\_d2\\_649\\_1\\_GJFZVX42Y9RRJH8\\_O9XJKQAUmd&nodeId=GJFZVX42Y9RRJH8&qid=1684177495926&sr=1](https://www.amazon.com/gp/help/customer/display.html?ref=hp_gcs_csd_d2_649_1_GJFZVX42Y9RRJH8_O9XJKQAUmd&nodeId=GJFZVX42Y9RRJH8&qid=1684177495926&sr=1) (дата обращения: 24.04.2023).
2. Умный дом, послушный дом // www.apple.com. – URL: <https://www.apple.com/ru/ios/home/> (дата обращения: 25.04.2023).
3. Home Assistant // se.ewi.tudelft.nl. – URL: <https://se.ewi.tudelft.nl/desosa2019/chapters/home-assistant/> (дата обращения: 30.04.2023).
4. Awaken your home. Home-Assistant // www.home-assistant.io. – URL: <https://www.home-assistant.io/> (дата обращения: 26.04.2023).
5. Тукмачева, Ю. А. Коммуникация между разными частями в многопоточном приложении / Ю. А. Тукмачева, А. В. Шицелов // Инновационные научные исследования – 2021. – № 12–2 (14). – С. 207–215.
6. Васильчиков, М. Г. Разработка вебсервера для удаленного управления системой «Умный дом» / М. Г. Васильчиков, А. В. Клименко // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XXI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов. – Гомель, 2018. – С. 83–84.
7. Advantages and Disadvantages of Golang (Go) // Software-developer-india. – URL: <https://www.software-developer-india.com/advantages-and-disadvantages-of-golang-go/> (дата обращения: 10.04.2023).
8. Saxena, S. Implications of MQTT connectivity protocol for IoT based device automation using home assistant and OpenHAB / S. Saxena, S. Jain, D. Arora, P. Sharma // 6th International conference on computing for sustainable global development. – 2019. – P. 475–480.

**References**

1. Alexa Smart Home // amazon.com. – URL: [https://www.amazon.com/gp/help/customer/display.html?ref\\_=hp\\_gcs\\_csd\\_d2\\_649\\_1\\_GJJFZVX42Y9RRJH8\\_O9XJKQAUmd&nodeId=GJJFZVX42Y9RRJH8&qid=1684177495926&sr=1](https://www.amazon.com/gp/help/customer/display.html?ref_=hp_gcs_csd_d2_649_1_GJJFZVX42Y9RRJH8_O9XJKQAUmd&nodeId=GJJFZVX42Y9RRJH8&qid=1684177495926&sr=1) (accessed 04/24/2023)
2. Smart home, obedient home. *www.apple.com*. URL: <https://www.apple.com/ru/ios/home/> (accessed 25.04.2023).
3. Home Assistant. *se.ewi.tudelft.nl*. URL: <https://se.ewi.tudelft.nl/desosa2019/chapters/home-assistant/> (accessed 30.04.2023).
4. Awaken your home. Home-Assistant. *www.home-assistant.io*. URL: <https://www.home-assistant.io/> (accessed 26.04.2023).
5. Tukmacheva, Yu. A., Shitselov, A. V. Communication between different parts in a multithreaded application. *Innovative Scientific Research*, 2021, no. 12–2 (14), pp. 207–215.
6. Vasilchikov, M. G., Klimenko, A. V. Development of a web server for Smart Home system remote control. New mathematical methods and computer technologies in design, production and scientific research : materials of the XXI Republican scientific conference of undergraduate and postgraduate students. Gomel, 2018, pp. 83–84.
7. Advantages and Disadvantages of Golang (Go). *Software-developer-india*. URL: <https://www.software-developer-india.com/advantages-and-disadvantages-of-golang-go/> (accessed 10.04.2023).
8. Saxena, S., Jain, S., Arora, D., Sharma, P. Implications of MQTT connectivity protocol for IoT based device automation using home assistant and OpenHAB. *6th International conference on computing for sustainable global development*, 2019, pp. 475–480.

Статья поступила в редакцию 21.07.2023; одобрена после рецензирования 21.10.2023; принята к публикации 06.12.2023.

The article was submitted 21.07.2023; approved after reviewing 21.10.2023; accepted for publication 06.12.2023.

## **МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

DOI 10.54398/20741707\_2024\_1\_37  
УДК 004.056

### **ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ГИПЕРГРАФА В ЦИКЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И РЕАГИРОВАНИЯ НА ИНЦИДЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

*Золотарев Вячеслав Владимирович*, Сибирский государственный университет науки и технологий, 660037, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности информационных технологий, ORCID: 0000-0002-8054-8564, e-mail: zolotarev@sibsau.ru

Для динамически изменяющихся объектов управления в задаче управления информационной безопасностью возникают новые задачи, такие как изменение подходов к сбору и анализу данных, разработка динамических сценариев реагирования на инциденты информационной безопасности. Они должны быть решены через создание применимых в указанной задаче алгоритмов, моделей, методик и подходов управления безопасностью, в том числе на уровне организации процессов, работы с данными и формирования архитектуры информационной безопасности организации. Необходимо в первую очередь создать основу для реагирования в виде модели управляемого объекта, что, в свою очередь, позволит сформировать единый подход для представления управляемых объектов в виде унифицированных записей, удобных для автоматизированного анализа. В настоящей работе приведен вариант модели управляемого объекта на основе гиперграфа с возможностью представления в виде покрытия его звездами в графовой модели. Показана привязка модельной задачи к свойствам объектов задачи управления информационной безопасностью. Статья также содержит ограничения и применимые меры контроля в части управления объектами в цикле непрерывного детектирования и реагирования на инциденты информационной безопасности, а также приложение к задаче управления информационной безопасностью вопросов эксфильтрации данных. Упоминаются также условия контроля эксфильтрации данных. Результаты работы могут быть использованы как для имитационных моделей, так и для реализации в виде модели управляемого объекта для процессов управления информационной безопасностью в практических задачах.

**Ключевые слова:** управление информационной безопасностью, процессный подход, алгоритм управления безопасностью, модель управляемого объекта, управление на основе данных, эксфильтрация данных, гиперграф

*Финансирование:* исследование выполнено при финансовой поддержке Минцифры РФ (Грант ИБ). Проект № 40469-01/2022-д.

### **CONTROLLED OBJECT MODEL BASED ON A HYPERGRAPH IN THE CONTINUOUS DETECTION AND RESPONSE CYCLE TO INFORMATION SECURITY INCIDENTS**

*Zolotarev Vyacheslav V.*, Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation,

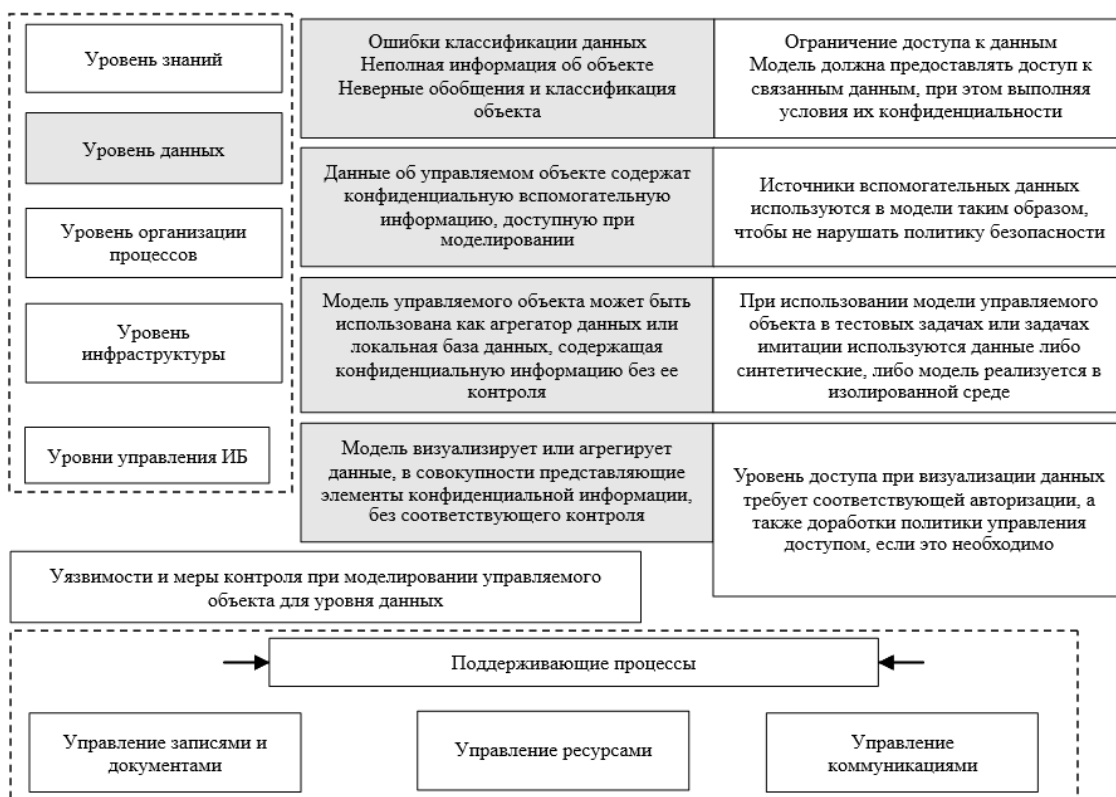
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Information Technologies Security Department, ORCID: 0000-0002-8054-8564, e-mail: zolotarev@sibsau.ru

For dynamically changing management objects, new tasks arise in the task of information security management, such as changing approaches to data collection and analysis, developing dynamic scenarios for responding to information security incidents. They should be solved through the creation of algorithms, models, methods and approaches of security management applicable to this task, including at the level of organizing processes, working with data and forming the organization's information security architecture. First of all, it is necessary to create a basis for responding in the form of a managed object model, which in turn will allow forming a unified approach for presenting managed objects in the form of unified records convenient for automated analysis. In this paper, a variant of a controlled object model based on a hypergraph is presented, with the possibility of representing it as a covering with stars in a graph model. The binding of the model task to the properties of the objects of the information security management task is shown. The article also contains restrictions and applicable control measures regarding the management of objects in the cycle of continuous detection and response to information security incidents, as well as an application to the task of information security management of data exfiltration issues. The conditions for controlling data exfiltration are also mentioned. The results of the work can be used both for simulation models and for implementation in the form of a managed object model for information security management processes in practical tasks.

**Keywords:** information security management, process approach, security management algorithm, managed object model, data-based management, data exfiltration, hypergraph

*Financial Support: the work was supported by the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Communications of the Russian Federation (IS Grant). Project No. 40469-01/2022-D.*

#### Graphical annotation (Графическая аннотация)



#### ВВЕДЕНИЕ

Основой моделирования управляемого объекта в задачах детектирования и реагирования на инциденты информационной безопасности, а также в задачах управления информационной безопасностью в целом, является возможность представления существенных свойств такого объекта в виде списков, матриц или наборов ограничений, которые могут быть преобразованы для визуализации в задачах принятия решений.

Частым решением для задачи моделирования управляемого объекта является использование математических моделей связности, таких как графовые модели. Аналогом такой модели является модель на основе графов (или ее обобщение на основе гиперграфа), используемая разработчиками электроники для представления ситуации, когда несколько разнородных элементов подключены к единой цепи. Известный пример таких графовых и матричных моделей в современных задачах информационной безопасности – цепочки атак (*kill chain*) [1]. Цепочка атак через граф (матрицу), описывающую атаку, с использованием стандартных техник и тактик злоумышленников представляет последовательность действий, которые использует злоумышленник. Для задачи моделирования интересно то, что при построении цепочки атаки используются возможности корреляции различных событий безопасности. То есть здесь имеется, согласно общепринятому определению, идентифицированное возникновение состояния системы, сервиса или сети, указывающего на возможное нарушение политики информационной безопасности, или сбой средств контроля, или ранее неизвестную ситуацию, которая может быть значимой для безопасности (ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 18044).

Для настоящего исследования также интересно то, что корреляция событий может показать неочевидные связи по параметрам и свойствам управляемых объектов. Матричные модели широко применяются на практике. К примеру, можно проанализировать собранную информацию о возможных событиях безопасности через классификацию по угрозам Mitre Att@ck [2] или БДУ ФСТЭК [3], по сути представляющих собой матрицы связанных объектов с описаниями и характеристиками каждого из них.

Сам цикл непрерывного детектирования и реагирования, для которого и требуется предложить модель управляемого объекта в настоящем исследовании, представляет собой переход к непрерывному детектированию и реагированию на динамически формирующийся ландшафт угроз безопасности

информации, что приводит к изменению базовых основ управления информационной безопасностью от уровня инфраструктуры (принятие решений на основе данных средств защиты информации) до уровня разработки сценариев реагирования на инциденты информационной безопасности (принятие решений о реагировании на основе сценарного подхода и комплексной автоматизации процессов) [4].

При этом управляемый объект может иметь множество свойств и параметров, но заранее предсказать, каким именно образом будут связаны несколько объектов в цепочку атаки, для общего случая невозможно. Наиболее простой контрпример для указанной ситуации – уязвимость «нулевого дня», еще не открытая на момент моделирования, но связывающая в цепочку атаки несколько управляемых объектов.

### **СВОЙСТВА ФОРМИРУЕМОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА**

На уровне общей схемы и работы с данными добавляется также следующее условие: существует необходимость получить доступ к как можно большему количеству источников для сбора, анализа, валидации и верификации информации; с точки зрения информационной безопасности это будет нарушением принципа минимизации полномочий и локализации объектов защиты информации в инфраструктуре организации, если не будут приняты соответствующие усилия по формированию дополнений в политику информационной безопасности организации.

Итак, основными принципами при моделировании управляемого объекта становятся:

1. Все данные и знания, ключевые для выполнения операций над объектом, должны быть связаны с объектом и храниться в общей для объекта и автоматизированного процесса управления операционной среде. Это соответствует общей концепции управления информационной безопасностью на основе цикла непрерывного детектирования и реагирования на инциденты информационной безопасности [5]. При этом связь управляемого объекта с другими объектами должна быть достаточно информативной, чтобы отражать неполную или вновь внесенную информацию эффективно.

2. Разнородные объекты могут иметь различные типы связей, но при этом связи должны показывать объединяющие их свойства, в том числе динамически меняющиеся в зависимости от ландшафта угроз.

3. Процесс формирования свойств объектов и процесс детектирования событий безопасности – дискретные, слабо структурированные процессы, для которых характерна неполная информация или недостаток (а возможно и стохастичность) исходных данных.

Аналогия представленной задачи – это задача проектирования сложных систем из разнородных компонентов, к примеру, для эволюционного моделирования сложных систем [6]. В задачах создания прикладного программного обеспечения, основанных на концепции объектно-ориентированного программирования, также могут быть использованы графовые и гиперграфовые модели, описывающие свойства компонентов, объединяемых в единые динамически формируемые структуры. Интересным здесь представляется использование графов и гиперграфов для формирования обобщающих связей, детектирования объединяющих свойств различных объектов, в том числе если эти свойства формируются динамически [6–8]. К примеру, такая задача характерна для формирования web-компонентов с использованием моделей генераторов кода, что аналогично поставленной во введении задачи формирования управляемого объекта с учетом корреляции событий и свойств объекта в части использования стандартных классов и свойств [9].

С учетом ранее указанных принципов сформулируем задачу в виде задачи математического моделирования дискретных слабо структурированных процессов, для которых характерны множественность критериев, стохастичность, интервальность или нечеткость значений исходных данных. Хорошие результаты при моделировании такого вида задач показывают модели на основе гиперграфов [10].

Графовые модели в этом случае требуют разработки дополнительных критериев сравнения моделируемых объектов, таких как меры семантической близости [11]. В целом можно отметить, что аналогичные задачи также решаются при построении онтологий.

Относительно аналогий на основе графов, представленных в обзоре выше, также можно отметить проблему неаддитивности функций, задающих вес ребер гиперграфов. Суть этого свойства заключается в том, что на практике оказывается нереальным определить правило или алгоритм, который представлял бы вес ребра гиперграфа в виде суммы весов вершин этого ребра или графовых ребер, определенных на множестве этих вершин [10]. Такая проблема может возникнуть, если свойства объектов, применимые в задачах информационной безопасности, имеют количественное выражение и при этом не привязаны к конкретному свойству конкретного объекта (пример приведен ниже).

Итак, относительно модели управляемого объекта можно сформулировать следующее: модель может быть построена как на базе гиперграфа (с представлением объединяющих свойств моделируемых объектов как гиперребер, в том числе и с количественными характеристиками), так и на базе графа с дополнительными свойствами вершин и ребер. В дальнейшем в статье будут приведены некоторые примеры использования именно моделей на основе гиперграфа.

Кроме того, очевидно, что при работе автоматизированных алгоритмов агрегирования данных для формирования модели управляемого объекта возникнет вопрос работы с данными различной степени конфиденциальности, в том числе и непомеченными. Очевидно, что это данные, потенциально требующие ограничения доступа. Известны решения по поиску и тегированию конфиденциальной информации, к примеру, в патентах [12, 13]. В целом проблема ранее рассмотрена автором в работе [14].

Также проблема работы с данными при управлении на основе данных, поиска конфиденциальной информации в базах данных рассматривалась для задач управления прямым доступом к данным [15].

Итак, проблема **эксфильтрации данных** возникает при обмене данными между участниками процессов и объектами, содержащими необходимые им данные (узлами документооборота, внешними и внутренними агрегированными базами данных). При этом возникающие потоки данных могут быть нарушающими принятые политики безопасности в отношении информационного обмена, а коммуникации – скрытыми, неявными или слабоконтролируемыми [16].

Таким образом, для управления на основе данных должны существовать отдельные правила и применимые политики, исключающие или снижающие вероятность эксфильтрации данных.

Исследование, предлагаемое вниманию, содержит рекомендации по внедрению алгоритмов контроля, по введению строгих и слабых (основанных на риск-ориентированном подходе) требований к контролю эксфильтрации данных, что придает гибкость задачам управления безопасностью и работы с информационными ресурсами организации.

**Целью исследования**, результаты которого приведены ниже, является решение следующей задачи: предложить модель управляемого объекта для концепции управления информационной безопасностью, основанной на непрерывном детектировании и реагировании на инциденты информационной безопасности, учитывающую ограничения по эксфильтрации данных при их агрегации для формирования модели управляемого объекта.

Новыми результатами исследования, представленными ниже, стали:

1. Модель управляемого объекта для концепции управления информационной безопасностью, основанной на непрерывном детектировании и реагировании на инциденты информационной безопасности, созданная на гиперграфе, что позволяет более эффективно (за меньшее количество операций) представлять цепочку атаки как комплексный управляемый объект.

2. Алгоритм формирования такой модели, учитывающий ограничения по эксфильтрации данных при их агрегации для формирования модели управляемого объекта.

#### **МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА И ЕЕ ОГРАНИЧЕНИЯ**

Управление информационной безопасностью в рамках предлагаемой концепции в целом должно генерировать базовые процессы, применимые меры контроля, указанные в работе [16]. Процессы должны учитывать как требования локальных политик безопасности, так и наборы ограничений, формируемые в рамках управления требованиями в системе управления информационной безопасностью организации.

Следовательно, модель управляемого объекта должна учитывать приведенные ограничения и соответствовать введенным ранее политикам безопасности.

Кроме того, модель управляемого объекта должна быть применима для задач с ограничением доступа к данным, то есть иметь возможность формирования с отказом от автоматического или автоматизированного сбора для всех возможных ролей или функциональных обязанностей. Это ограничение реализуется через введение соответствующих ролей при ролевом управлении доступом к данным или соответствующих наборов ограничений при дискреционном или мандатном управлении доступом.

Следовательно, в рамках концепции также должно быть обеспечено быстрое развертывание применимых мер контроля информационной безопасности. Далее рассмотрим математическую основу указанного подхода.

#### **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА**

В предлагаемой модели для каждого состояния  $s_i$  в этом случае имеется гиперграф определенного (статичного либо динамического) вида, где вершинами графа  $X$  примем активы (процессы, сценарии, элементы инфраструктуры, в том числе виртуальные), а ребрами графа  $U$  – регламентированные или нерегламентированные, скрытые или явные свойства, используемые в принятии решений в задачах детектирования и реагирования на инциденты информационной безопасности. Каждое состояние также имеет определенное для него значение функции оценки допустимости состояния с позиции эксфильтрации [14], т. е. для каждого состояния можно определить, нарушаются ли правила доступа к источникам знаний и/или данных. На уровне источников знаний возможно рассматривать отдельные подразделения, экспертов, экспертные или рабочие группы, СЗИ (средства защиты информации), внешние средства контроля и мониторинга (рис.).

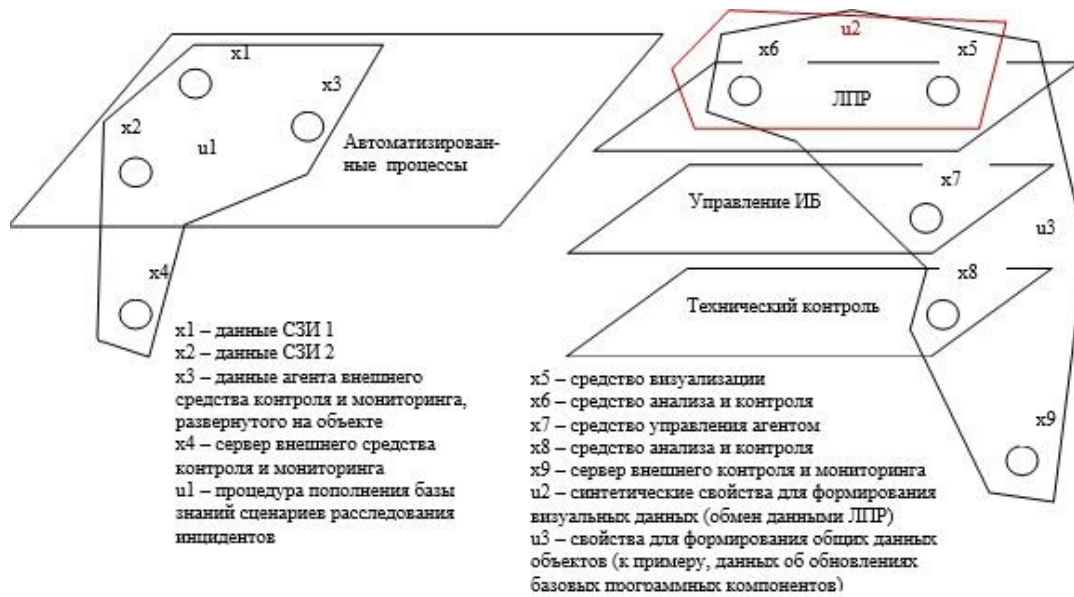


Рисунок – Примеры возможных гиперграфов для рассматриваемой задачи

Как видно из примера, для предлагаемой схемы управления информационной безопасностью допустимо также расширение границ контроля за пределы физической инфраструктуры заказчика, управляемый объект может представлять собой виртуальную структуру, частично или полностью контролируемую провайдером услуг безопасности. Это удобно с точки зрения представления задачи реагирования на инциденты информационной безопасности, основанной на модели аутсорсинга – в этом случае управляемый объект может быть представлен как объединение инфраструктур (двудольный гиперграф) для облачного решения провайдера и инфраструктуры заказчика.

В целом моделью управляемого объекта в рамках предлагаемой концепции будет гиперграф  $H$  следующего вида (2):

$$H = (X, U, R), \tag{2}$$

где  $X = \{x_i, i \in I\}$  представляет собой множество активов (процессов, сценариев, элементов инфраструктуры и т. д.), определенное для типового или детализированного процесса детектирования и реагирования на инциденты информационной безопасности;

$U = \{u_j, j \in J\}$  представляет собой множество свойств, используемых в принятии решений в задачах детектирования и реагирования на инциденты информационной безопасности (и может быть определено автоматизированно, на основе опроса системы или данных агентов, размещенных на элементах инфраструктуры, а может быть сформировано на основе конфигурации типового процесса, развернутого по схеме «Инфраструктура как код»);

$R \Leftrightarrow R(x, u)$  – двуместный предикат, определяющий возможность передачи данных и/или знаний через свойства объектов по определенному каналу и в штатном режиме функционирования автоматизированного процесса, представляющий собой коннектор определенного вида, работающий как со средством автоматизации конкретного бизнес-процесса управления информационной безопасностью, так и с источником данных.

При этом допустимо, что определенные значения предиката могут быть изменены и, таким образом, изменена модель управления объектом.

Также в рамках задачи имеет значение применение изоморфных гиперграфов, т. е. таких, для которых сохраняется соотношение (3):

$$\forall x \in X, \forall x' \in X', \forall u \in U, \forall u' \in U' \{x \leftrightarrow x' \& u \leftrightarrow u' \Rightarrow R(x, u) \Leftrightarrow R'(x', u')\}. \tag{3}$$

Таким образом, предполагается, что если модель объекта при изменении формируется в виде изоморфного исходному (до изменения) гиперграфу, то изменение автоматизированного процесса не требуется. Если же при этом не выполняется условие (1), то должно быть сформировано изменение процесса в части корректировки предиката  $R$  для конкретного состояния или группы состояний подсистем объекта. Следовательно, решение задачи автоматизации сбора и анализа данных может быть представлено как предикат гиперграфа  $H_0$ , представляющего собой модель управляемого объекта (или изоморфного ему гиперграфа, к примеру, для тестового стенда или цифрового двойника). Таким образом может быть проанализировано решение задачи контроля эксфильтрации данных для указанного объекта.

По-видимому, в рамках контроля эксфильтрации данных и действий можно потребовать, чтобы гиперграф являлся антицепью, т. е. его ребра не содержались одно в другом; кроме этого, наибольшее независимое множество гиперграфа  $H_0$  должно быть минимизировано, т. е. все критичные активы должны быть включены в контур мониторинга.

Для данных и автоматизированных сценариев на основе анализа выполнения условия (1) и оценки возможности формирования предиката  $R$  могут быть сформированы наборы корректирующих действий, регулирующих работу с признаками эксфильтрации данных, эксфильтрации действий или нарушением примененных политик и процедур управления информационной безопасностью, как в примере работы [16].

Далее же рассматривается пример формирования модели управляемого объекта с одним общим свойством на экспериментальной задаче.

#### АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦИИ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Далее же рассматривается два примера автоматизации на экспериментальных задачах одного из типовых процессов управления информационной безопасностью (управление уязвимостями информационных систем), когда управляемый объект представляет собой централизованную (пример 1, таблица) и децентрализованную (пример 2, таблица) системы. Свойством, объединяющим модели объектов внутри процесса моделирования, выбрана общая уязвимость, использованная злоумышленником для доступа в систему.

Алгоритм генерации выглядит следующим образом:

1. **Сбор данных об объектах**, включая анализ данных об уязвимостях объектов из общедоступных баз знаний [2, 3].

2. **Работа с тестовыми данными**, предполагающая анализ возможности использования уязвимости для реализации техник и тактик, используемых злоумышленником, также на основе открытых данных [2].

3. **Формирование модели объекта**, содержащей базовые свойства объекта на основе типовых свойств класса объектов (процесс, элемент инфраструктуры, база данных и прочее). Базовые свойства объекта должны формироваться на основе агрегирования данных об активах (т. е. на базе регулярного процесса инвентаризации активов).

4. **Формирование уточненной модели управляемого объекта**, содержащей количественные оценки общих свойств.

5. **Формирование уточненной модели управляемого объекта** (если это возможности), содержащей количественные оценки обобщенного свойства нескольких объектов, в том числе на основе **ретроспективного корреляционного анализа данных** о событиях безопасности.

6. **Формирование уточненной модели управляемого объекта** (если это возможно), содержащей количественные оценки обобщенного свойства нескольких объектов для случая неполных исходных данных, **синтезированные на основе известных данных** аналитическим или алгоритмическим путем.

Таблица – Формирование модели управляемого объекта

Пример 1. Централизованная система			
Объект (пример)	Действие алгоритма	Общее свойство и его количественная оценка	Количественная оценка свойства (вес гиперребра)
Процесс резервирования критических данных	Сбор данных об объекте	BDU:2023-08127*: уязвимость программного обеспечения администрирования инфраструктур хранения данных Количественная оценка свойства: базовая оценка CVSS 3.0 составляет 5,5	-
	Работа с тестовыми данными	Изменение количественной оценки свойства с учетом временной метрики	Оценка количественной оценки с учетом контекстной метрики
	Формирование модели объекта	Гиперграф на основе организационных схем и диаграмм потоков данных объекта	Уточнение с учетом существующих формализованных и неформализованных способов обработки данных
	Формирование уточненной модели управляемого объекта	Уточненная диаграмма потоков данных с учетом возможных векторов атак, восстановленных по ретроспективным данным	Уточнение с учетом существующих формализованных и неформализованных способов обработки данных

Продолжение таблицы

Пример 2. Децентрализованная система			
Процесс резервирования критичных данных в изолированных сегментах	Сбор данных об объекте	Аналогично	Аналогично
	Работа с тестовыми данными	Аналогично	Аналогично
	Формирование модели объекта	Аналогично	Аналогично
	Формирование уточненной модели управляемого объекта	Аналогично	Аналогично
	Предиктивный анализ (ретроспективный)	Для изолированных сегментов обмен информацией о возможных векторах атак, информация о которых содержится в ретроспективных данных только некоторых из них	Уточнение через тестирование конкретного вектора атаки (пентест)
	Предиктивный анализ (синтез свойств)	Для изолированных сегментов обмен информацией о возможных векторах атак, информация о которых синтезирована на основе неполных данных	Уточнение через анализ защищенности сегмента

\*Уязвимость в примере устранена.

Таким образом, возможно построение модели управляемого объекта, содержащей любое заданное количество свойств, в том числе и динамически определяемое, на основе предлагаемого подхода и описанного выше алгоритма формирования. Модель управляемого объекта может содержать общие с другими управляемыми объектами свойства, в том числе с синтезированными или ретроспективно определенными количественными оценками (весами гиперребер), что позволяет гибко подходить к задачам комплексного анализа сложной совокупности объектов и визуализации цепочек атак.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование сосредоточено на формировании пригодных в практике рекомендаций моделей управляемых объектов, основанных на гиперграфах, для задач управления информационной безопасностью, учитывающей как традиционно рассматриваемые уровни управления инфраструктурой информационной системы и управления организационными процессами, так и новый, расширяющий модель уровень данных, в том числе с учетом требований к контролю эксфильтрации данных.

Перспективой исследования является формирование различных типов гиперграфов, моделирующих реальные структуры цепочек атак, и обобщение их свойств через анализ возможностей действий злоумышленников. Таким образом, исследование может предложить инструмент для улучшения подхода к формированию открытых баз знаний о действиях злоумышленников.

Подобное расширение может быть полезно при развертывании разных типов экспертных и советующих систем, систем поддержки принятия решений, ситуационных центров и особенно интегрально для задач управления знаниями, опирающихся на описанный подход к формированию моделей управляемых объектов, которые возможно рассмотреть в отдельных исследованиях.

### Список источников

1. Hutchins, E. M. Intelligence-Driven Computer Network Defense Informed by Analysis of Adversary Campaigns and Intrusion Kill Chains / E. M. Hutchins, M. J. Cloppert, R. M. Amin // Lockheed Martin Corporation. – URL: <https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/cyber/LM-White-Paper-Intel-Driven-Defense.pdf>.
2. MITRE ATT&CK. – URL: <https://attack.mitre.or>.
3. Банк данных угроз безопасности информации / Федеральная служба по техническому и экспортному контролю, Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации. – URL: <https://bdu.fstec.ru>.
4. Ghanizada, I. IT prediction: the vast majority of security operations workloads will be automated / I. Ghanizada. – URL: <https://cloud.google.com/blog/products/identity-security/it-prediction-vast-majority-of-security-operations-workloads-will-be-automated>.
5. Олейникова, А. А. Концепция управления информационной безопасностью на основе цикла непрерывного детектирования и реагирования на инциденты информационной безопасности / А. А. Олейникова, В. В. Золотарев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2023 (в печати).
6. Волович, И. В. О теории моделирования и гиперграфе классов / И. В. Волович, М. Н. Хохлова // Труды МИАН. Избранные вопросы радической математической физики и анализа : сборник статей. К 80-летию со дня рождения академика Василия Сергеевича Владимировича. – Москва : МАИК «Наука/Интерпериодика», 2004. – Т. 245. – С. 281–287.

7. Мунтян, Е. Р. Представление знаний в граф-моделях сложных технических систем / Е. Р. Мунтян // Информатизация и связь. – 2020. – № 3. – С. 12–16. – DOI 10.34219/2078-8320-2020-11-3-12-16. – EDN DHDAXZ.
8. Шарипбай, А. А. Представление и обработка знаний хранящихся в многомерных данных посредством расширенного базового семантического гиперграфа / А. А. Шарипбай, А. Б. Барлыбаев, Т. С. Сабиров // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2016. – № 6. – С. 197–202. – EDN ZIGKUF.
9. Головкин, Ю. Б. Применение нечетких гиперграфов в моделях генерации web-компонентов / Ю. Б. Головкин, А. С. Гусаренко // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 9. – С. 47–53. – EDN SMPATF.
10. Омельченко, Г. Г. Гиперграфовые модели и методы решения дискретных задач управления в условиях неопределенности : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Г. Г. Омельченко. – Ставрополь, 2004. – 19 с. – EDN NIBJUN.
11. Асанов, А. З. Применение графовых моделей в проектном управлении / А. З. Асанов, И. Ю. Мышкина, Л. Ю. Грудцына // Онтология проектирования. – 2023. – № 2 (48). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-grafovykh-modeley-v-proektnom-upravlenii> (дата обращения: 26.11.2023).
12. Патент РФ 2 759 786 С1. Способ и система классификации данных для выявления конфиденциальной информации / А. А. Теренин. – Заявл. 05.07.2019 ; опубл. 17.11.2021.
13. Патент РФ 755 606. Способ и система классификации данных для выявления конфиденциальной информации в тексте / А. А. Теренин. – Заявл. 16.10.2019 ; опубл. 17.09.2021.
14. Zolotarev, V. Data Exfiltration Control in the Data-Driven Management / V. Zolotarev, M. Lapina, E. Lapina, M. Anita EA, M. Sajid // Adv. in Systems Science and Appl. (in print).
15. Хоанг, В. К. Метод контроля прямого доступа к семантическим базам данных / В. К. Хоанг, А. Ф. Тузовский // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 5. – С. 138–142.
16. Золотарев, В. В. Алгоритм контроля эксфильтрации данных с учетом требований управления на основе данных / В. В. Золотарев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – № 4 (64).

#### References

1. Hutchins, E. M., Cloppert, M. J., Amin, R. M. Intelligence-Driven Computer Network Defense Informed by Analysis of Adversary Campaigns and Intrusion Kill Chains. *Lockheed Martin Corporation*. URL: <https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/cyber/LM-White-Paper-Intel-Driven-Defense.pdf>.
2. MITRE ATT&CK. URL: <https://attack.mitre.org>.
3. *Data bank of information security threats*. Federal Service for Technical and Export Control, State Research and Testing Institute of Problems of Technical Protection of Information. URL: <https://bdu.fstec.ru>.
4. Ghanizada, I. *IT prediction: the vast majority of security operations workloads will be automated*. URL: <https://cloud.google.com/blog/products/identity-security/it-prediction-vast-majority-of-security-operations-workloads-will-be-automated>.
5. Oleynikova, A. A., Zolotarev, V. V. The concept of information security management based on the cycle of continuous detection and response to information security incidents. *Izvestia of the Southern Federal University. Technical sciences*, 2023 (in print).
6. Volovich, I. V., Khokhlova, M. N. On the theory of modeling and hypergraphy of classes. *Proceedings of MIAN Selected issues of radic mathematical physics and analysis : collection of articles. To the 80th anniversary of the birth of Academician Vasily Sergeevich Vladimirova*. Moscow, MAIK "Science/Interperiodika", 2004, vol. 245, pp. 281–287.
7. Muntyan, E. R. Representation of knowledge in graph models of complex technical systems. *Informatization and Communication*, 2020, no. 3, pp. 12–16. DOI 10.34219/2078-8320-2020-11-3-12-16. EDN DHDAXZ.
8. Sharipbai, A. A., Barlybaev, A. B., Sabyrov, T. S. Representation and processing of knowledge stored in multidimensional data by means of an extended basic semantic hypergraph. *Open semantic technologies for designing intelligent systems*, 2016, no. 6, pp. 197–202. EDN ZIGKUF.
9. Golovkin, Yu. B., Gusarenko A. S. Application of fuzzy hypergraphs in models of generation of web components. *News of higher educational institutions. Instrumentation*, 2014, vol. 57, no. 9, pp. 47–53. EDN SMPATF.
10. Omelchenko, G. G. *Hypergraphic models and methods for solving discrete control problems under uncertainty : specialty 05.13.18 "Mathematical modeling, numerical methods and software packages" : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences*. Stavropol, 2004. 19 p. EDN NIBJUN.
11. Asanov, A. Z., Myshkina, I. Yu., Grudtsyna, L. Yu. Application of graph models in project management. *Design ontology*, 2023, no. 2 (48). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-grafovykh-modeley-v-proektnom-upravlenii> (accessed 11.26.2023).
12. Terenin, A. A. *Patent RF 2,759,786 C1. Method and system of data classification for identifying confidential information*. Appl. 05.07.2019 ; publ. 17.11.2021.
13. Terenin, A. A. *Patent RF 755 606 C2. Method and system of data classification for identifying confidential information in the text*. Appl. 16.10.2019 ; publ. 17.09.2021.
14. Zolotarev, V., Lapina, M., Lapina, E., Anita, M. EA, Sajid, M. Data Exfiltration Control in the Data-Driven Management. *Adv. in Systems Science and Appl.* (in print).
15. Hoang, V. K., Tuzovsky, A. F. Method of controlling direct access to semantic databases. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 5, pp. 138–142.
16. Zolotarev, V. V. Algorithm for controlling data exfiltration with the requirements of data-based management. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2023, no. 4 (64).

Статья поступила в редакцию 26.11.2023; одобрена после рецензирования 14.12.2023; принята к публикации 26.12.2023.

The article was submitted 26.11.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 26.12.2023.

DOI 10.54398/20741707\_2024\_1\_45  
УДК 004.056

**ПОВЫШЕНИЕ ГРАМОТНОСТИ ОБЩЕСТВА  
В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕЙМИФИКАЦИИ**

*Сугак Валерия Андреевна*, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420006, Российская Федерация, Казань, ул. Карла Маркса, 68,

бакалавр, ORCID: 0009-0001-8579-0667, e-mail: valeria.sugack@yandex.ru

*Мережников Даниил Андреевич*, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420006, Российская Федерация, Казань, ул. Карла Маркса, 68,

бакалавр, ORCID: 0009-0006-0814-4764, e-mail: Shinamia@yandex.ru

*Сафиуллина Лина Хатыповна*, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420006, Российская Федерация, Казань, ул. Карла Маркса, 68,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-2765-0973, e-mail: lina.kh.safiullina@mail.ru

*Алексеева Анна Александровна*, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420006, Российская Федерация, Казань, ул. Карла Маркса, 68,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-6119-1934, e-mail: annank90@mail.ru

Геймификация – это методология, которая может быть успешно применена в различных сферах организации предприятия. В частности, она может быть использована для обучения новых сотрудников, повышения квалификации уже имеющегося персонала и подготовки к кризисным ситуациям. Введение элементов игры и соревнования в процесс обучения позволяет сотрудникам применять полученные знания и навыки в реальных ситуациях, что повышает их эффективность и способность реагировать на угрозы информационной безопасности. Кроме того, использование геймификации стимулирует мотивацию сотрудников и улучшает их вовлеченность в процесс обучения. Одной из особенностей геймификации является возможность создания персонажей, которые отражают реальные должности и функции сотрудников организации. Авторы предлагают новые подходы к обучению персонала реагированию инцидентов информационной безопасности, которые ставят процесс учебы под конкретные потребности и особенности организации. Кроме того, результаты игры могут быть представлены в виде описания состояния компании и условий работы сотрудников, которые являются следствием принимаемых во время игры решений. Использование геймификации в обучении информационной безопасности имеет не только преимущества для сотрудников, но и для самой организации. Она помогает сотрудникам развивать необходимые навыки и знания, а также повышает их мотивацию и участие в обучении. В результате информационная безопасность организации улучшается, а риск возникновения угроз снижается.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, геймификация, киберграмотность, защита информации, обучение персонала, операционная система, Astra Linux SE

**INCREASING PUBLIC LITERACY  
IN THE FIELD OF INFORMATION SECURITY  
USING GAMIFICATION ELEMENTS**

*Sugak Valeria A.*, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marks St., Kazan, 420006, Russian Federation,

bachelor, ORCID: 0009-0001-8579-0667, e-mail: valeria.sugack@yandex.ru

*Merezhnikov Daniil A.*, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marks St., Kazan, 420006, Russian Federation,

bachelor, ORCID: 0009-0006-0814-4764, e-mail: Shinamia@yandex.ru

*Safiullina Lina Khatypovna*, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marks St., Kazan, 420006, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-2765-0973, e-mail: lina.kh.safiullina@mail.ru

*Alekseeva Anna A.*, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marks St., Kazan, 420006, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-6119-1934, e-mail: annank90@mail.ru

Gamification is a methodology that can be successfully applied in various areas of enterprise organization. In particular, it can be used to train new employees, improve the staff skills and prepare for crisis situations. Introducing game and competition elements into the training process allows employees to apply acquired knowledge and skills in real-life situations, which increases their efficiency and ability to respond to information security threats. In addition, the use of gamification stimulates employees' motivation and improves their involvement in the learning process. One of the features of gamification is the ability to create characters that reflect the real positions and functions

of the organization's employees. The authors propose new approaches to training personnel to respond to information security incidents, which allow the learning process to be tailored to the specific needs and characteristics of the organization. In addition, the results of the game can be presented in the form of a description of the state of the company and the working conditions of employees, which are a consequence of the decisions made during the game. Using gamification in information security training not only has benefits for employees, but also for the organization itself. It helps employees develop the necessary skills and knowledge, and increases their motivation and participation in training. As a result, the organization's information security improves and the risk of threats is reduced.

**Keywords:** information security, gamification, cyber literacy, information security, personnel training, operating system, Astra Linux SE

#### Graphical annotation (Графическая аннотация)



#### ВВЕДЕНИЕ

В современном мире технологий степень защиты информации организации имеет ключевое значение, поскольку последствия доступа злоумышленников к конфиденциальным данным могут нанести значительный урон и привести к колоссальным убыткам. Согласно [1], количество атак на критические информационные инфраструктуры (КИИ) в 2023 г. увеличилось в глобальном масштабе, причем не только промышленные предприятия и бизнес-структуры, но и региональные и федеральные органы власти постоянно сталкиваются с кибератаками на ИТ-инфраструктуру своих ведомств. Так, наиболее частым компьютерным инцидентом является случайное/преднамеренное скачивание программ-вымогателей, способных зашифровать содержимое жестких дисков и SSD, парализуя при этом работу целых информационных сегментов организации. Основные причины проведения атак, направленных на подобное нарушение конфиденциальности и доступности информации:

- низкий уровень цифровой культуры в корпорациях и государственных организациях [2];
- низкий уровень киберграмотности и информированности сотрудников, не связанных непосредственно с обеспечением информационной безопасности (ИБ) и деятельностью ИТ-инфраструктуры [2, 3];
- недооценка важности компьютерных угроз и их последствий;
- нехватка цифровых компетенций у персонала, отвечающего за ИБ и функционирование ИТ-инфраструктуры [3].

Очевидно, что обучение персонала основам ИБ, принципам управления ИБ и реагированию на компьютерные инциденты является необходимым условием безопасности любой организации. Зачатую процесс обучения, который проводится сотрудниками подразделений защиты информации или учебных центров, включает лекции, изучение инструкций и методик, а также проверку остаточных знаний в виде теста и ответа на вопросы [4]. Подобный метод обучения вызывает негатив среди сотрудников, так как отсутствует понимание важности, и необходимость запоминания большого количества материала отнимает много ценного рабочего времени [5]. В таких условиях становится актуальным вопрос о применении новых методов обучения персонала ИБ и цифровой грамотности в организациях. Одним из таких методов является геймификация процесса обучения [6].

Геймификация в обучении – это стратегия, которая использует элементы и механизмы игры или симуляции реальных ситуаций [7] в негеймовых контекстах для мотивации, вовлечения и достижения целей. К элементам геймификации можно отнести:

- вознаграждение – предоставление пользователю виртуальных или реальных наград за достижение определенных целей;
- уровни достижения – постепенное продвижение пользователя через уровни для стимулирования его участия;
- соревнования и рейтингование – создание соревновательной атмосферы с использованием рейтингов и таблиц лидеров;
- сюжет – использование элементов сюжета для создания более привлекательного опыта;
- социальные элементы – возможность взаимодействия и сотоварищества с другими участниками, создание сообществ.

Авторы настоящей статьи предлагают вариант внедрения элементов игры для обучения основам работы в ОС Astra Linux, а также управления ИБ в организации.

## АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕЙМИФИКАЦИИ В ОБУЧЕНИИ ЦИФРОВЫМ КОМПЕТЕНЦИЯМ

Как следует из [6] и [7], сегодня геймификация внедряется не только в традиционном обучении, но и в организациях в целях обучения персонала, повышения производительности труда и вовлечения сотрудников в бизнес-процессы предприятия. Интересным примером внедрения геймификации является проект оператора сотовой связи Tele2: для повышения клиент-ориентированности и опережающего решения проблем пользователей среди сотрудников был введен мотивационный онлайн-продукт «Walk The Talk». Механика этого продукта заключалась в следующем: команда каждого российского региона компании выбирает пять лучших игроков для сражения (агентов «Людей в чёрном») против виртуального врага (Таракана), чья сила зависит от выявленных в регионе проблем и показателей региона. Таракан появляется в раз в квартал, игроки получают предупреждение о нападении за две недели. Карта России на сайте отображает показатели регионов, и успехи/провалы видны всем игрокам. Маршрут Таракана также отображается на карте. Участники могут обменивать накопленные в течение игры очки в призовой лавке, включая сувениры и улучшения навыков, такие как участие в тренингах. Проект был реализован в разработанном приложении, размещенном на внутреннем портале Tele2. Результат проекта: уровень решения проблем в регионе до прилета врага (Таракана) составлял 63 %, а после прилета – уже 91 % [8].

Примерам геймификации для обеспечения информационной безопасности организации является игра Security Parashoot [9], которая позволяет легко донести правильные действия сотрудников в области парольной политики на предприятии, лучших практик, техник атак, защиты узлов, юридических вопросов и т. д. Phishing Phil [10] – еще один удачный игровой продукт для обучения информационной безопасности, где после игры пользователю приходит рассылка фишинговых писем, вредоносного ПО, которое не может нанести вред пользователю, но позволяет оценить, научился ли игрок отражать атаки.

Таким образом, применение геймификации является достаточно распространенной практикой при изучении как информационных технологий (ИТ), так и ИБ. Далее будут рассмотрены методы геймификации для изучения отечественной операционной системы Astra Linux и моделирования действия специалистов по информационной безопасности в случае атаки.

### ОБУЧЕНИЕ ОСНОВАМ ASTRA LINUX С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕЙМИФИКАЦИИ

Операционная система Astra Linux Special Edition 1.7 [11] является одной из ведущих операционных систем, используемых в сфере информационной безопасности в РФ. К разделам, выбранным для процесса геймификации, были отнесены понимание архитектуры ОС GNU/Linux и назначения разных типов файлов Linux, а также отработка навыков работы в командной строке bash. Авторами была разработана виртуальная новелла на базе движка RenPy, в которой необходимо играть за главную героиню Астри. Вводные данные были следующими:

«Астри живет спокойной и размеренной жизнью в маленьком городке. Она любила свою работу в местном кафе и наслаждалась каждым днем. Но в один момент все изменилось – произошла семейная трагедия, для решения которой было необходимо большое количество средств, а Астри не имела достаточно денег, чтобы ее оплатить.

Однако в их городе была только одна крупная компания, связанная с ИТ. Астри никогда не интересовалась этой сферой и не имела никаких навыков в этой области. Но она решила, что это ее единственный шанс заработать необходимую сумму. Она начала изучать программирование и другие ИТ-навыки, читать книги и ходить на курсы.

С каждым днем Астри становилась все более увлеченной и уверенной в своих способностях. Но прошло несколько месяцев, прежде чем она наконец-то решилась подать заявку на работу в эту компанию. К ее удивлению, она была принята на стажировку, где ей предстояло доказать свои навыки и знания.

Астри с упорством и настойчивостью преодолевала все трудности и препятствия на пути к своей цели. Она училась на ошибках, просила помощи у коллег и постепенно становилась все более квалифицированной. В конце концов, она получила предложение о работе в этой компании и смогла оплатить операцию для своей мамы».

Примеры тестовых вопросов, которые были в новелле:

1. *Последней версией Astra Linux является...*
2. *Какая команда в Linux является эквивалентом диспетчера задач в Windows?*
3. *Какой дисплейный менеджер используется в Astra Linux?*
4. *Выберите 3 основных типа файлов в Linux-системах?*

Во второй части новеллы были вопросы на сопоставления. Пример представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Пример вопросов на сопоставление

На рисунке 2 представлен скриншот текстового окна новеллы.

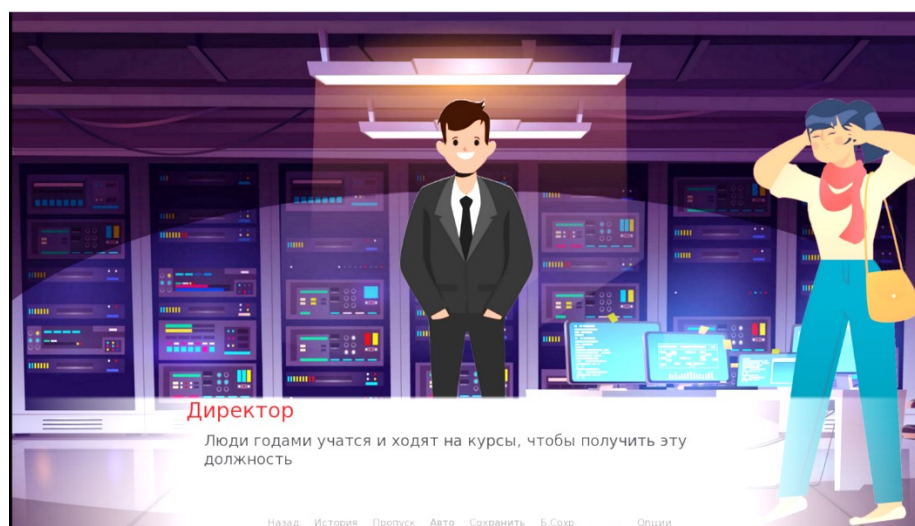


Рисунок 2 – Скриншот текстового окна новеллы

Изучение эффективности применения такой новеллы при изучении Astra Linux проводилось в формате очной игры в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» в апреле 2023 г. с участием 15 человек, из которых 5 уже были знакомы с Linux-системами.

На рисунке 3 приведены количественные показатели усвоения тем в процентном соотношении:

- 80 % усвоили тему «Понимание архитектуры ОС GNU/Linux»;
- 30 % усвоили тему «Понимание назначения разных типов файлов linux»;
- 60 % усвоили тему «Работы в командной строке bash».

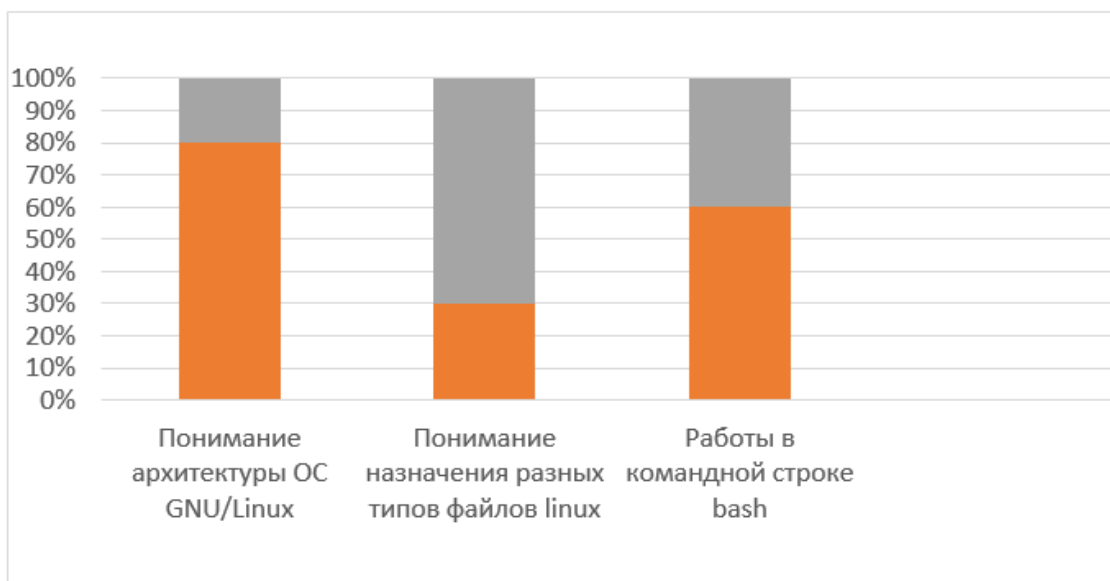


Рисунок 3 – Количественные показатели усвоения тем при использовании элементов геймификации

### ГЕЙМИФИКАЦИЯ ПРИ ОБУЧЕНИИ СОТРУДНИКОВ ЦИФРОВОЙ ГРАМОТНОСТИ И КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

Применение геймификации для обучения сотрудников цифровой грамотности и кибербезопасности может оказаться значительно эффективнее для организации с точки зрения сохранения конфиденциальных данных [12, 13]. Авторами был разработан проект «Стретта», который заключается в обучении студентов защите личной и конфиденциальной информации в игровой форме.

Для реализации проекта используются следующие основные правила:

1. Процесс игры осуществляется по сети либо с применением искусственного интеллекта. Регистрация в игре происходит по электронной почте.

2. В игре существуют 3 роли: защитник, злоумышленник и рядовой пользователь. Игровое поле с цветовой классификацией цветом определяет вид поединка (рис. 4):

- красный – поединок аппаратный (какое оборудование у вас есть для защиты или атаки);
- синий – поединок правовой (например, связанный с политикой безопасности);
- зеленый – поединок программный (какое защитное ПО у вас установлено или, наоборот, какое зловредное ПО будет использовано);
- оранжевый – поединок, связанный с человеческим фактором;
- фиолетовый – кража карты у противника (в том случае, если у него их больше двух);
- белый – движение вперед к следующей белой клетке;
- черный – движение назад до предыдущей черной клетки.

Помимо цветовой классификации на клетках может присутствовать 2 символа: сердце – дополнительная карта, стрелка – вернуть одну из карт.

Когда фишка останавливается на клетке красного, синего, зеленого или оранжевого цвета – предстоит поединок с одним из противников на выбор игрока. Для сражения игрок выставляет одну из карт. От цвета клетки зависит, какой параметр участвует в поединке. Игрок, на карте которого параметр будет больше, выигрывает поединок.

На каждой карте указывается количество шагов вперед в случае выигрыша/потери, а также шаги назад в случае проигрыша. После сражения карты убираются в колоду, а игроки берут новые карты. Для выигрыша обязательно придется встать на последнюю оранжевую клетку и победить в поединке человеческого фактора. Также в углах каждой карты есть четыре цветовых значения (красный, синий, зеленый и оранжевый), которые также соответствуют цвету с видом поединка.

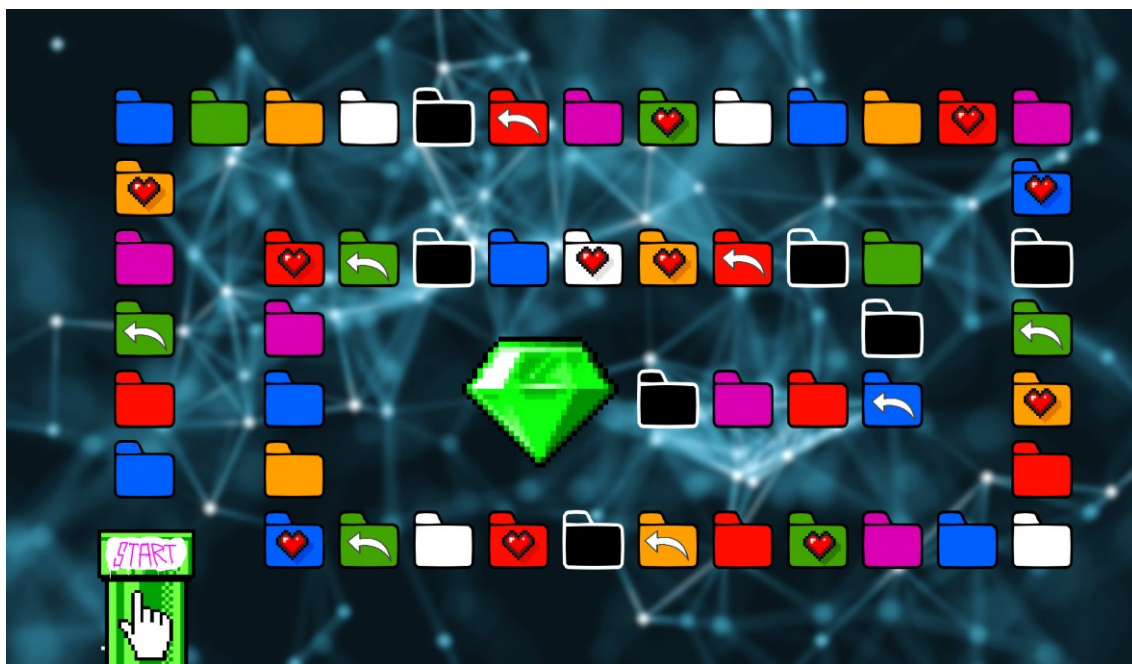


Рисунок 4 – Игровое поле игры «Стретта»

Цель игры – дойти до финиша с минимальными потерями и уязвимостями. Перед игрой каждому игроку раздается по три карты, злоумышленнику выдается 6 карт. Ходы осуществляются по рулетке.

Основная задача в случае вытягивания роли защитника ИБ и пользователя – предотвращение ситуации или минимизирование ущерба, в случае злоумышленника – сыграть ситуацией себе на руку и скомпрометировать данные или нанести ущерб. Среди своих карт игрок выбирает с наибольшим числом в синем кружочке. На экране появится выбранная карта и та, которую вы выбрали у второго игрока. Выигрывает игрок, у которого значение на карте правовой защиты больше. Далее обе карты автоматически ложатся рубашкой вверх в верхнюю часть экрана (на кон), и игрок получает еще одну карту. Аналогичные действия для красного, оранжевого и зеленого цвета.

Если фишка попадает на черную клетку (ЧС: природная катастрофа или эпидемия), то она возвращается назад на предыдущую черную клетку. Если фишка попадает на белую клетку (благоприятная ситуация – увеличение бюджета, грант, открытие новой технологии и т. д.), она автоматически идет вперед на следующую белую клетку и дает усиление к какому-либо одному параметру (в зависимости от ситуации). Если фишка выпадает на фиолетовое поле, игрок может взять одну карту у любого игрока.

Если фишка попадает на клетку со стрелкой, карта игрока кладется на кон в верхнюю часть экрана, затем одна карта выбирается у другого игрока, и осуществляется обмен. В случае попадания фишки на поле с сердечком, берется карта с кона, а затем производится обмен согласно цвету поля (например, красное сердечко – меняете карту по максимально возможному значению аппаратной защиты или уязвимости).

Существуют различные карты в зависимости от персонажа, например, системный администратор Алмаз (защитник ИБ), начальник отдела документооборота Наташа, (защитник ИБ), хакер Hell.En (злоумышленник), стажер Константин (защитник ИБ), сотрудник банка Аделя (пользователь), сотрудник компании, предоставляющей телекоммуникационные услуги Олег (пользователь), Амирхан (продавец сим-карт компании, предоставляющей телекоммуникационные услуги, цифровые и медийные сервисы) (пользователь), начальник Олега и Амирхана – Владлен (злоумышленник), сотрудник банка, занимающийся вымогательством, – Алексей (злоумышленник), руководитель компании «ТехноТат», в которой работают Алмаз и Наташа, – Дмитрий (пользователь), сотрудница отдела документооборота в компании «ТехноТат» – Айгуль (пользователь), глава отдела ИБ в «ТехноТат» – Андрей (защитник ИБ) и т. д. Список персонажей может пополняться. Каждому персонажу даётся краткое описание, на карте представлен вес в том или ином поединке (цифра на цветном круге), а также особые условия, которые могут повлиять на сохранение безопасности данных. Например: Аделя встречается с Алмазом, и карта Алмаз может дать карте Аделя улучшение +4 к поединку по аппаратной защите (обучает ее разным примочкам и программам). Или если карта Владлен проиграет или получит удар, то она остается, а игрок с картой Олег ее теряет. Аналог: если Владлен попадает на атаке, то его они обходят мимо и весь удар принимают на себя сотрудники Олег и Амирхан и т. д. Примеры карточек некоторых персонажей представлены на рисунке 5.



Рисунок 5 – Карточки персонажей и их описания, используемые в игре

Как видно из карточек, механика игры устроена таким образом, что учитывает взаимоотношения между людьми и человеческий фактор при реализации сценария обучения. Так, для оранжевых клеток, которые учитывают человеческий фактор, разработано 6 кейсов, которые представлены на рисунке 6.

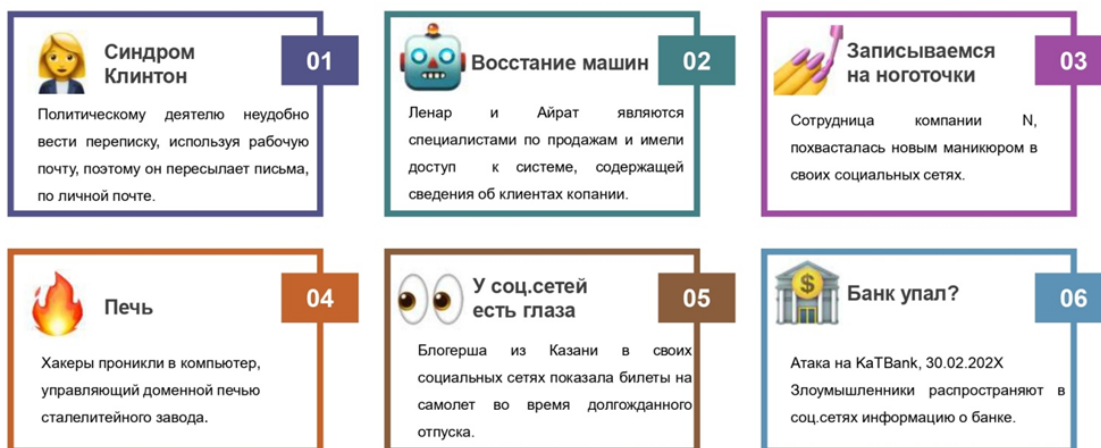


Рисунок 6 – Примеры кейсов для оранжевых клеток

Проект «Стретта» успешно проявил себя при обучении кибербезопасности студентов, однако авторы утверждают, что проект может быть направлен на повышение кибербезопасности в целом.

Данный пример геймификации может являться базой для разработки специализированного приложения для обучения информационной безопасности в организации с учетом специфики и области деятельности предприятия. Персонажи могут быть использованы в соответствии с занимаемыми должностями, функционал приложения может быть расширен согласно функционалу персонажей, а итоги игры можно представить в виде состояния компании и условия работы сотрудников, которые являются следствием принимаемых во время игры решений.

С целью расширения возможностей проект «Стретта» и интеграции его в конкретную организацию был разработан следующий алгоритм, представленный на рисунке 7.

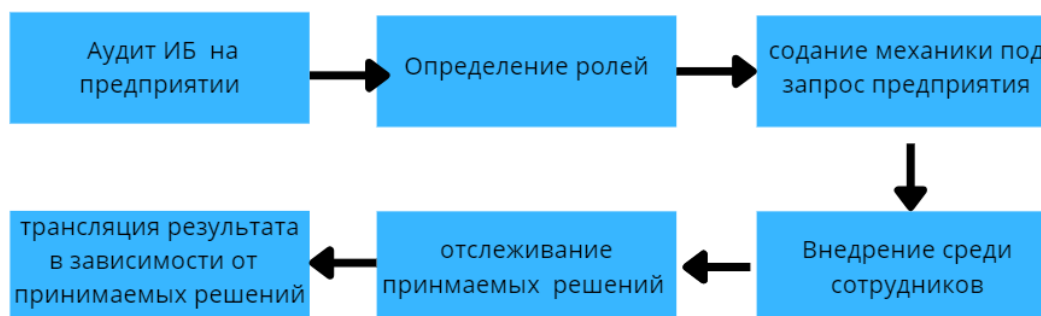


Рисунок 7 – Алгоритм создания игры для обучения сотрудников организации информационной безопасности

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геймификация может быть использована в различных сферах организации предприятия, таких как обучение новых сотрудников, повышение квалификации существующих сотрудников и подготовка к кризисным ситуациям. Такой подход позволяет сотрудникам применять полученные знания и навыки в случае реальных кейсов, что улучшает их эффективность и способность реагировать на угрозы информационной безопасности. Кроме того, введение элементов геймификации при подготовке сотрудников стимулирует их мотивацию сотрудников, позволяет им осваивать быстрее новые концепции и навыки, а также способствует развитию командного духа и сотрудничеству среди участников обучения.

В целом использование геймификации в обучении информационной безопасности может быть эффективным способом повышения грамотности общества в этой области. Она помогает сотрудникам организации развивать необходимые навыки и знания, а также повышает их мотивацию и участие в обучении. Это может привести к улучшению информационной безопасности организации и снижению риска возникновения угроз.

### Список источников

1. Теоретико-методические основы повышения качества профессионального образования специалистов в сфере информационных технологий / Н. И. Никитина, В. М. Гребенникова, Е. В. Комарова [и др.]. – Москва : Перспектива, 2023. – 353 с.
2. Попков, Г. В. Анализ существующих мер по информационной безопасности объектов критической инфраструктуры / Г. В. Попков, В. М. Деревяшкин // *Обработка информации и математическое моделирование*. – 2023. – С. 286–290.
3. Ворожцова, А. В. Развитие цифровых компетенций персонала как средство повышения информационной безопасности организации / А. В. Ворожцова, Н. В. Гончарова // XVII Международная конференция «Российские регионы в фокусе перемен»: сборник докладов (Екатеринбург, 17–19 ноября 2022 г.). – Екатеринбург : ООО Издательский Дом «Ажур», 2023. – С. 260–264.
4. Сафонов, К. В. Применение элементов геймификации в подготовке студентов-будущих специалистов в области защиты информации / К. В. Сафонов, Е. А. Ищукова, В. В. Золотарев // *Перспективы науки и образования*. – 2021. – № 1 (49). – С. 450–463.
5. Ахметшин, Э. М. Цифровая экономика и улучшение системы образования в России / Э. М. Ахметшин, В. Л. Васильев // *Экономика и менеджмент систем управления*. – 2022. – Т. 43, № 1. – С. 4–13.
6. Астахова, Л. В. Развитие цифровых компетенций будущих специалистов по защите информации в вузе / Л. В. Астахова, И. А. Сафонова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Образование. Педагогические науки*. – 2020. – Т. 12, № 1. – С. 61–74.
7. Исупова, Н. И. Использование элементов геймификации при изучении криптографических методов защиты информации / Н. И. Исупова // *Евразийское научное объединение*. – 2018. – № 3–4. – С. 230–233.
8. Баранова, И. П. Совершенствование механизма мотивирования персонала в высокотехнологичных компаниях / И. П. Баранова // *Инновации и инвестиции*. – 2023. – № 4. – С. 113–116.

9. Operation Security ParaShoot. – URL: <https://securitygamehold.inverra.com/> (дата обращения: 25.10.2023).
10. Phishing Phil. – URL: [https://cups.cs.cmu.edu/antiphishing\\_phil/](https://cups.cs.cmu.edu/antiphishing_phil/) (дата обращения: 25.10.2023).
11. Astra Linux. – URL: <https://astralinux.ru/> (дата обращения: 25.10.2023).
12. Емалетдинова, Г. Э. Геймификация как метод обучения: особенности и возможности / Г. Э. Емалетдинова и др. // Московский экономический журнал. – 2022. – № 3. – С. 702–708.
13. Zolotarev, V. V. Role and Task Based Model Adaptation for Security Awareness Game / V. V. Zolotarev et al. // 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). – IEEE, 2021. – P. 773–777.

#### References

1. Nikitina, N. I., Grebennikova, V. M., Komarova, E. V. et al. *Theoretical and methodological foundations for improving the quality of professional education of specialists in the field of information technology*. Moscow, Perspektiva Publ., 2023. 353 p.
2. Popkov, G. V., Derevyashkin, V. M. Analysis of existing measures for information security of critical infrastructure facilities. *Information processing and mathematical modeling: materials of the All-Russian scientific and technical conference with international participation*. Novosibirsk, Ibirsk State University of Telecommunications and Informatics, 2023, pp. 286–290.
3. Vorozhtsova, A. V., Goncharova, N. V. Development of digital competencies of personnel as a means of increasing the information security of the organization. *XVII International conference “Russian regions in the focus of change” : collection of reports (Ekaterinburg, November 17–19, 2022)*. Ekaterinburg, LLC Publishing House “Azhar”, 2023, pp. 260–264.
4. Safonov K. V., Ishchyukova, E. A., Zolotarev, V. V. Application of gamification elements in the training of students – future specialists in the field of information security. *Perspectives of Science and Education*, 2021, no. 49 (1), pp. 450–463.
5. Akhmetshin, E. M., Vasiliev, V. L. Digital economy and improving the education system in Russia. *Economics and Management of Control Systems*, 2022, no. 1 (43), pp. 4–13.
6. Astakhova, L. V., Safonova, I. A. Development of digital competences of future specialists in information security at university. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Education. Educational sciences*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 61–74.
7. Isupova, N. I. Using gamification elements when studying cryptographic methods of information security. *Eurasian Scientific Association*, 2018, no. 3–4, pp. 230–233.
8. Baranova, I. P. Improving the mechanism for motivating personnel in high-tech companies. *Innovation and Investment*, 2023, no. 4, pp. 113–116.
9. Operation Security ParaShoot. Available at: <https://securitygamehold.inverra.com/> (accessed 25.10.2023).
10. Phishing Phil. Available from: [https://cups.cs.cmu.edu/antiphishing\\_phil/](https://cups.cs.cmu.edu/antiphishing_phil/) (accessed 25.10.2023).
11. Astra Linux. Available from: <https://astralinux.ru/> (accessed 25.10.2023).
12. Emaletdinova, G. E. et al. Gamification as a teaching method: features and opportunities. *Moscow Economic Journal*, 2022, no. 3, pp. 702–708.
13. Zolotarev, V. V. et al. Role and Task Based Model Adaptation for Security Awareness Game. *2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*. IEEE, 2021, pp. 773–777.

Статья поступила в редакцию 06.12.2023; одобрена после рецензирования 09.12.2023; принята к публикации 09.12.2023.

The article was submitted 06.12.2023; approved after reviewing 09.12.2023; accepted for publication 09.12.2023.

УДК 004.001

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**Кузнецова Валентина Юрьевна**, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6954-5020>, e-mail: [arhelia@bk.ru](mailto:arhelia@bk.ru)

**Подгорный Никита Олегович**, Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, студент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0370-4140>, e-mail: [work.spc@inbox.ru](mailto:work.spc@inbox.ru)

В статье рассматривается проблема автоматизации процесса составления типовых документов по информационной безопасности, такие как положения, инструкции, регламенты и пр. Отмечено, что в большинстве малых российских организаций в штате отсутствует специалист по информационной безопасности, поэтому является актуальной задача разработки сервиса по генерации типовых документов для представителей малого бизнеса. Авторами проведен патентный поиск и анализ предметной области, что подтвердило гипотезу об актуальности поставленной проблемы. В рамках данной работы была предпринята попытка структурировать и систематизировать имеющиеся требования к разработке нормативных документов по информационной безопасности, а также сформулировать тот перечень документов, которые может быть типизирован. На основании данной работы были разработаны требования к программному обеспечению, а также проектные диаграммы и алгоритм работы программного продукта.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, организационно-правовая защита информации, информационная система, генерация документов

## INFORMATION SYSTEM FOR GENERATING REGULATIVE DOCUMENTS IN THE FIELD OF INFORMATION SECURITY

**Kuznetsova Valentina Yu.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Digital Technologies, and Cybersecurity, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6954-5020>, e-mail: [arhelia@bk.ru](mailto:arhelia@bk.ru)

**Podgornyi Nikita O.**, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0370-4140>, e-mail: [work.spc@inbox.ru](mailto:work.spc@inbox.ru)

The article discusses the problem of automating the process of drawing up standard information security documents, such as regulations, instructions, regulations, etc. It is noted that most small Russian organizations do not have an information security specialist on staff, so the task of developing a service for generating standard documents for small business representatives. The authors conducted a patent search and analysis of the subject area, which confirmed the hypothesis about the relevance of the problem posed. As part of this work, an attempt was made to structure and systematize the existing requirements for the development of regulatory documents on information security, as well as to formulate a list of documents that can be typified. Based on this work, software requirements were developed, as well as design diagrams and an algorithm for the operation of the software product.

**Keywords:** information security, organizational and legal protection of information, information system, document generation

### Graphical annotation (Графическая аннотация)



## **ВВЕДЕНИЕ**

Интерес к рынку информационной безопасности растёт ежегодно, и чаще всего это связывают с ситуациями кражи данных, которые достаточно дороги как с точки зрения финансов, так и с точки зрения репутации и для крупного, и для мелкого бизнеса. Российская компания Idesco в конце 2023 г. представила обзор изменений в сфере кибербезопасности, и оказалось, что каждый год количество утечек данных из хранилищ российских проектов увеличивается – только в первом квартале анализируемого года было обнаружено 40 масштабных утечек персональных сведений, а сколько еще остались не освещёнными в прессе [6]? Также отмечено, что в минувшем году количество атак на российские информационные системы выросло на 65 %. Такая повышенная активность хакеров некоторыми экспертами связывается с уходом многих иностранных продуктов с российского рынка, и в этот переходный период компании ищут отечественные аналоги или ведут их разработку собственными силами. И то, и другое является существенной статьёй расходов ослабленного санкциями российского бизнеса.

С другой стороны, на компании оказывает влияние ужесточение штрафов за нарушение законодательства в области информационной безопасности. Получить предписание или даже наказание можно и без факта утечки данных. Особенно это касается малые предприятия, которые в попытке обеспечить требования законодательства в первую очередь обращают внимание на технические и программные средства защиты информации, игнорируя или откладывая в долгий ящик организационные меры по разработке документации. По открытой информации Роскомнадзора, штраф за нарушение законодательных требований в области персональных данных (без учета наказаний из-за утечки информации) составляет в среднем порядка 20 000 рублей. Сюда входят такие нарушения, как отсутствие документов о назначении ответственного за обработку персональных данных, отсутствие уведомления об обработке персональных данных и многие другие необходимые документы в сфере защиты персональных данных. При этом иногда компании дешевле оплатить данные штрафы, чем нанять отдельного сотрудника для подготовки пакета документации, так как статистика показывает, что в 60 % компаний отсутствует отдельный специалист по информационной безопасности. Чаще всего эти функции возложены на системного администратора, который не имеет достаточного уровня знаний и выполняет обязанности по защите данных по остаточному принципу.

При этом фактически разработка документов в области информационной безопасности зачастую сводится к работе с заранее подготовленными шаблонами документов, которые у представителей малого бизнеса являются похожими, что делает целесообразным разработку унифицированных, грамотно составленных шаблонов типовых документов, которые смогли бы использовать те организации, которые в настоящее время не могут себе позволить выделенного специалиста в штате. А с учетом того, что, по прогнозам различных аналитиков, например, топ-менеджера группы компаний Softline Дмитрия Васильева, до 2027 г. будет 10%-ный среднегодовой темп роста рынка кибербезопасности, интерес проверяющих структур к выполнению законодательных требований также будет ежегодно расти [6].

## **ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И АНАЛОГОВ**

Нормативное обеспечение процесса информационной безопасности является одним из основополагающим этапом при создании комплексной системы защиты информации [6]. Данному аспекту посвящено большое количество научных работ как юридического, так и технического профиля, а также статей, тезисов и учебно-методических пособий образовательного процесса.

Нормативная база данной предметной области формируется рядом государственных структур на разных уровнях. К основным авторам правовых документов, помимо президента Российской Федерации, правительства Российской Федерации и Законодательного собрания Российской Федерации, относятся ФСТЭК России, ФСБ России, Минкомсвязи, Роскомнадзор, Банк России, Министерство обороны РФ и Генеральный штаб ВС РФ, различные межведомственные комиссии по отдельным вопросам обеспечения информационной безопасности.

Нормативное правовое обеспечение информационной безопасности находит свое отражение в системе нормативных правовых актов, которые выступают в качестве источников права. К числу основных источников можно отнести:

- Конституцию РФ;
- международные договоры РФ;
- федеральные конституционные законы РФ;
- федеральные законы РФ, в том числе кодифицированные, такие как уголовный кодекс, гражданский кодекс и др.;
- подзаконные акты президента РФ и правительства Российской Федерации;
- акты законодательных и исполнительных органов власти субъектов РФ;
- решения Конституционного суда РФ;
- разъяснения Верховного суда РФ и Высшего арбитражного суда РФ [8].

Идея разработки программных продуктов, которые позволят оптимизировать труд специалистов путем генерации типовых документов, не нова, и в научном сообществе имеется немало трудов, которые описывают данную задачу. Одним из направлений работ является описание конкретного метода генерации документов из шаблона. Например, автор П. В. Сонин в работе описывает процесс генерации двух документов «Политика конфиденциальности» и «Согласие на обработку персональных данных» для конкретной компании посредством стандартных средств MS Office и возможностей написания макросов на языке C# [10]. Аналогичные методы предлагаются в работе П. В. Ереско, который рассматривает генерацию документов из шаблонов в юридической практике [4]. Г. П. Токмаров предлагает использовать формализованную процедуру SQL-XML для автоматизации работы с типовыми шаблонами [12]. Автор А. А. Раменский с помощью генерации шаблонов описывает в своей работе решение проблемы по унификации оформления текстовых документов, упоминая, что автоматизация позволяет существенно сократить время подготовки документации и освободить время исполнителей под более важные задачи [9]. Аналогичный вопрос, но уже в контексте управления персоналом и производительности труда рассматривает А. С. Григорьева в своей работе, проведя вычисления, из чего складывается финансовая выгода организаций при переходе к генераторам типовых документов [2].

В контексте обеспечения информационной безопасности процессу автоматизации разработки типовых документов по защите информации в ИСПДн посвящена работа Н. В. Ефимова, который описал собственноручно разработанное приложение, которое на основе короткого опроса пользователя определяет класс защищенности ИСПДн и на основании результатов опроса генерирует необходимый пакет документов [5].

Предлагаемый автором продукт затрагивает только узкое направление деятельности по защите информации, поэтому разработка решения с более расширенным функционалом видится актуальной задачей. При этом на рынке уже существуют шаблонизаторы документов для коммерческих учреждений, однако они либо вообще не ориентированы на информационную безопасность, а затрагивают классические документы по кадровому и бухгалтерскому учету (например, Doczilla), либо решают только конкретную задачу, например, защита персональных данных в сервисах FreshDoc и pdsec, либо являются глобальной экосистемой, такой как АльфаДок, и не имеют ориентации на малый бизнес.

Таким образом, авторами была поставлена задача разработать такой программный продукт, который бы учитывал наиболее распространенные типовые документы в области информационной безопасности. А для этого требуется проведение анализа и составление своего рода структуры локальных нормативных актов.

### СТРУКТУРИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ДОКУМЕНТОВ ОРГАНИЗАЦИЙ

Общая схема структуры документов в сфере информационной безопасности, необходимой малому и среднему бизнесу, включает в себя три вида документов: общие документы, документы по коммерческой тайне и пакет документов по работе с персональными данными. Важно отметить, что групп, которые можно выделить при работе с документацией по информационной безопасности, гораздо больше, однако такая документация чаще всего не относится к малому и среднему бизнесу и требует детальной проработки под конкретную организацию, что указывает на то, что данная документация не является типовой и требует выявления специфики при ее составлении и согласовании. К таким документам могут быть отнесены локальные акты, например, по работе с СКЗИ или государственными информационными системами.

Таким образом, в группу *общих документов* были включены:

- политика информационной безопасности, а также другие виды основополагающих документов, например, политика антивирусной защиты и т. д.;
- должностные инструкции сотрудников, в которых прописаны их обязанности по обеспечению информационной безопасности организации;
- документы, связанные с инцидентами информационной безопасности, такие как инструкции, регламенты, журналы учета;
- типовые инструкции – по организации парольной защиты, антивирусной защиты, использованию системы СКУД, использованию внешних носителей или электронной почты и т. д.;
- журналы учета, куда включены наиболее часто используемые формы журналов, например, учет внешних носителей, инструктажей, различных мероприятий в сфере защиты информации;
- документы, связанные с контролируемой зоной, – приказ, положение, инструкции.

К документам, которые необходимы для объявления *режима коммерческой тайны* в организации, были отнесены:

- положение о коммерческой тайне;
- приказ об установлении режима коммерческой тайны;
- перечень сведений, составляющих коммерческую тайну;
- журналы учета и регистраций;
- соглашения для контрагентов и сотрудников о соблюдении конфиденциальности.



Рисунок 1 – Предлагаемая авторами структура нормативно-правовой базы информационной безопасности

К локальным документам, которые необходимы для обеспечения безопасности персональных данных, были отнесены:

- различные положения и политики по работе с персональными данными;
- правила и инструкции для сотрудников, работающих с персональными данными;
- приказы о вводе в действие нормативных документов в области персональных данных, а также назначении комиссии, ответственных и пр.;
- журналы и формы учета, куда включены наиболее часто используемые формы журналов, например, журнал учета обращений, форма акта об уничтожении персональных данных и пр.

**ПРЕДЛАГАЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ РЕШЕНИЕ**

В рамках программного продукта осуществляют деятельность несколько стандартных пользователей:

- пользователь. После регистрации имеет доступ к функционалу заполнения личного профиля организации, генерации документов и модулю обратной связи. Данный функционал отражен в диаграмме использования на рисунке 2.
- администратор системы. Имеет весь перечисленный у пользователя функционал, а также добавление новых шаблонов документов и обработку обратной связи от пользователей.

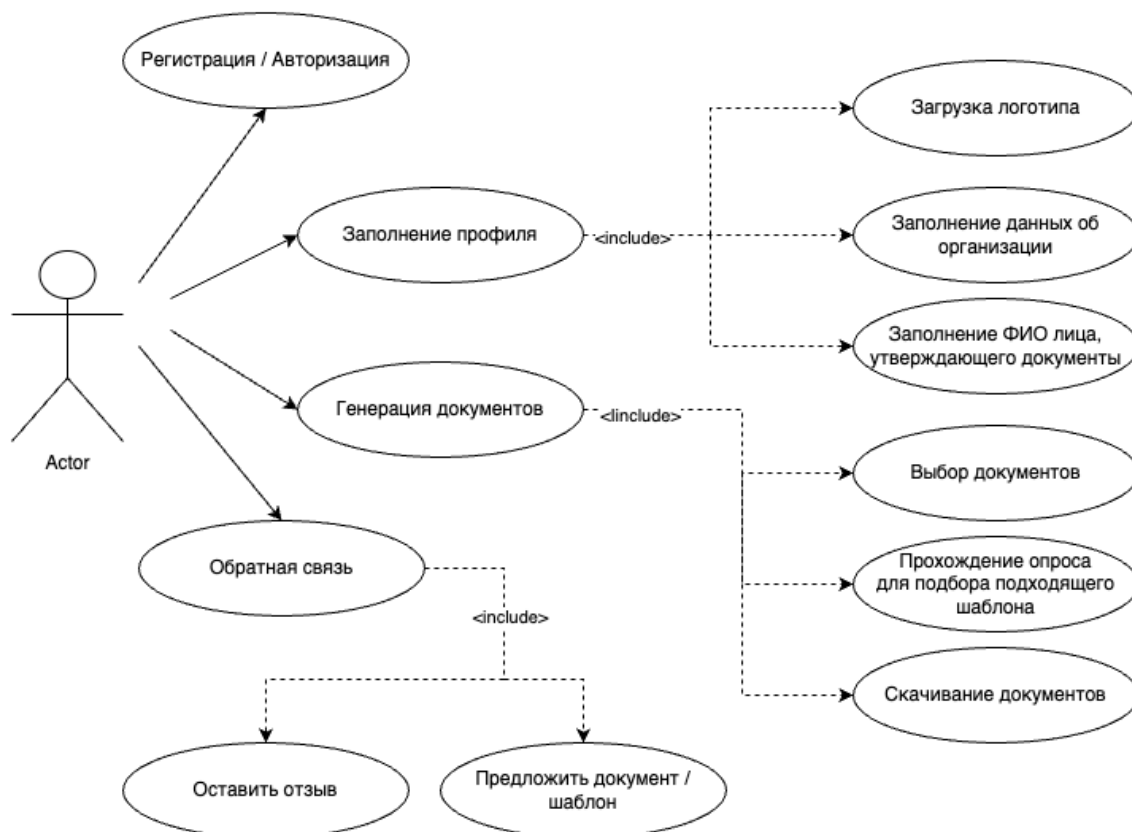


Рисунок 2 – Диаграмма вариантов использования

Разрабатываемый программный продукт представляет собой веб-приложение, реализованное с использованием микросервисной архитектуры. Для разработки используется язык Java Script и фреймворк React. Backend-компоненты разделяются на логические слои, такие как представление (Presentation Layer), бизнес-логика (Business Logic Layer) и доступ к данным (Data Access Layer). В качестве СУБД выбрана MongoDB, так как она наилучшим образом адаптирована для хранения документоориентированных данных.

Для использования функционала веб-приложения требуется регистрация в качестве пользователя. После регистрации пользователю доступно заполнение личного кабинета организации, где указывается название, ИНН и данные о руководителе организации вручную либо подгружается автоматически с помощью внешних интеграций по ИНН юридического лица.

После того как личный кабинет заполнен, пользователю становится доступен функционал генерации документов. Пользователь выбирает необходимый документ или несколько документов, отмечая их «галочкой». В результате того, какой тип документа выбран, система предлагает пользователю ответить на несколько вопросов, в зависимости от ответов на которые будет выбран наиболее подходящий шаблон типового документа. Например, если пользователь хочет выгрузить пакет документов по персональным данным, система запросит у него информацию о том, чьи данные обрабатываются в системе, какая их категория и какое количество субъектов ПДн будут подвергнуты обработке.

Алгоритм работы предлагаемого программного решения приведен на рисунке 3.

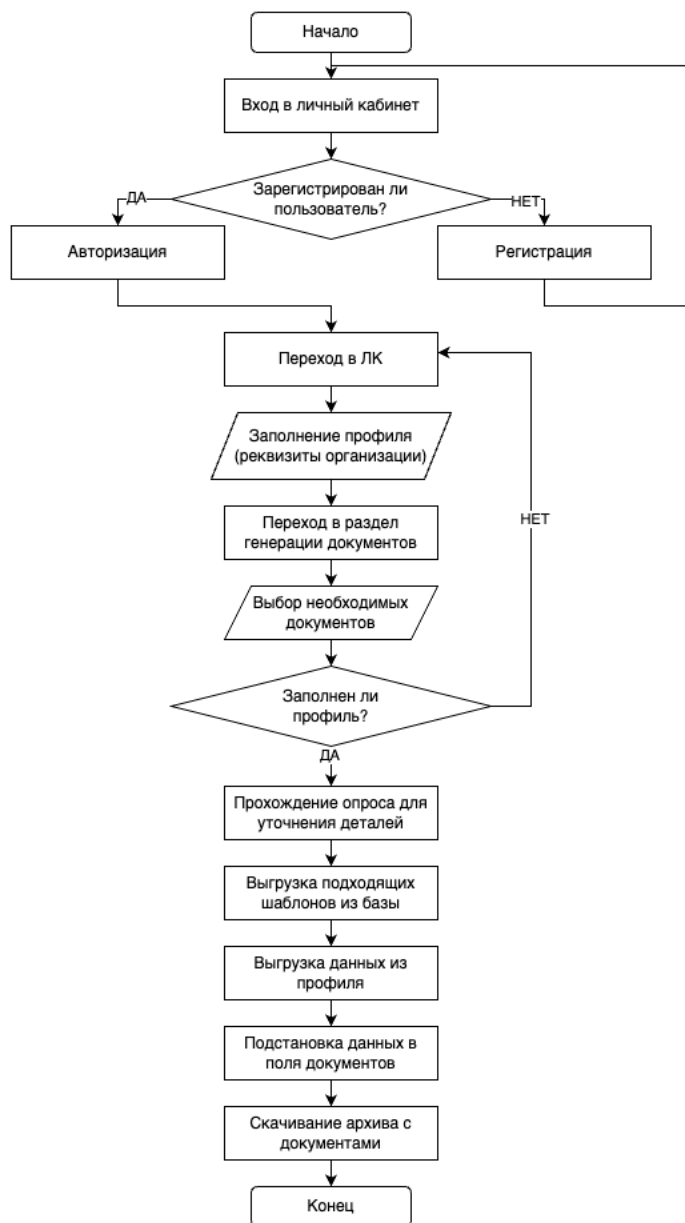


Рисунок 3 – Алгоритм работы программного продукта

Документы выгружаются в формате pdf по умолчанию. При необходимости пользователь может выгрузить документы в формате docx, однако с предупреждением от системы, что внесенные вручную правки могут повлиять на целостность и корректность самого шаблона.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассматривается проблема автоматизации процесса составления типовых документов по информационной безопасности, такие как положения, инструкции, регламенты и пр. Отмечено, что в большинстве малых российских организаций в штате отсутствует специалист по информационной безопасности, поэтому является актуальной задача разработки сервиса по генерации типовых документов для представителей малого бизнеса. Авторами проведен патентный поиск и анализ предметной области, что подтвердило гипотезу об актуальности поставленной проблемы, на основании чего была принята попытка структурировать и систематизировать имеющиеся требования к разработке нормативных документов по информационной безопасности, а также сформулировать тот перечень документов, который может быть типизирован. Так для последующей автоматизации было выбрано три крупных группы документов – общие документы, персональные данные и коммерческая тайна.

На базе предложенной структуры нормативных актов разработаны требования к программному обеспечению, а также проектные диаграммы и алгоритм работы программного продукта.

## Список источников

1. Ажмухамедов, И. М. Методы автоматизации анализа текстовой информации на русском языке с целью выявления ее семантической направленности / И. М. Ажмухамедов, Е. Е. Завьялова, В. Ю. Кузнецова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 2 (50). – С. 118–126. – EDN THMSQT.
2. Григорьева, А. С. Оптимизация процесса создания типового проекта документа с целью повышения производительности труда / А. С. Григорьева // Вестник науки и образования. – 2017. – № 7 (31). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-protsesta-sozdaniya-tipovogo-proekta-dokumenta-s-tselyu-povysheniya-proizvoditelnosti-truda> (дата обращения: 25.02.2024).
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619917 Российская Федерация. Компонент автогенерации типовых документов по запросу пользователя на основе шаблонов для облачной информационной системы KONGRESS : № 2016615287 ; заявл. 24.05.2016 ; опубл. 01.09.2016 / А. А. Даньковский ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Социальные конференционные технологии» (ООО «СКТ»). – EDN ZGCVBP.
4. Ереско, П. В. Создание и модификация шаблонов типовых юридических документов компьютерными программными средствами / П. В. Ереско // Вестник Саратовской государственной академии права. – 2008. – № 6 (64). – С. 135–139. – EDN JXLWDL.
5. Ефимов, Н. В. Автоматизация создания типовых документов по защите информации в ИСПДН / Н. В. Ефимов // Информационная безопасность: современная теория и практика : сборник научных трудов студентов, аспирантов и преподавателей по материалам III Межвузовской научно-практической конференции, Омск, 24 ноября 2020 года / ответственный редактор З. В. Семенова. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2020. – С. 49–56. – EDN BQZUTL.
6. Информационная безопасность (рынок России). – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Информационная\\_безопасность\\_\(рынок\\_России\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Информационная_безопасность_(рынок_России)) (дата обращения: 29.02.2024).
7. Проталинский, О. М. Информационная безопасность ВУЗА / О. М. Проталинский, И. М. Ажмухамедов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 1. – С. 18–23. – EDN JWRBWN.
8. Проценко, Е. А. Организация и структура информационного законодательства в системе обеспечения информационной безопасности России / Е. А. Проценко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – № 32. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-i-struktura-informatsionnogo-zakonodatelstva-v-sisteme-obespecheniya-informatsionnoy-bezopasnosti-rossii> (дата обращения: 21.02.2024).
9. Раменский, А. А. Веб-сервис для автоматизации стилевой настройки и создания типовых документов / А. А. Раменский // Молодежная научная весна : материалы I научно-практической конференции молодых исследователей ЗабГУ : в 4 ч., Чита, 10–14 апреля 2023 года / отв. редактор А. Е. Селин. – Чита : Забайкальский государственный университет, 2023. – Т. 1. – С. 23–26. – EDN KQTGQZ
10. Сатлайкина, Д. В. Роботизация формирования типовых документов с контролем форматирования на платформе PIX RPA / Д. В. Сатлайкина // Eurasiascience : Сборник статей LIII международной научно-практической конференции, Москва, 15 мая 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность.РФ", 2023. – С. 75–76. – EDN FUGBLZ.
11. Сонин, П. В. Разработка программного обеспечения для автоматического формирования типовых документов / П. В. Сонин // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 11–13 октября 2018 года. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2018. – С. 188–189. – EDN VOLAZS.
12. Токмаков, Г. П. Разработка системы публикации документов, основанной на SQL- и XML-технологиях / Г. П. Токмаков // Автоматизация процессов управления. – 2008. – № 2. – С. 8–16. – EDN MUYVCP.
13. Mi, L. Construction and Application of an Automatic Document Generation Model / L. Mi, C. Li, P. Du, J. Zhu, X. Yuan and Z. Li // 2018 26th International Conference on Geoinformatics. – Kunming, China, 2018. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2018.8557127.
14. Zahorodko, P. V. An approach for processing and document flow automation for Microsoft Word and Libre Office Writer file formats / P. V. Zahorodko, P. V. Merzlykin // CEUR Workshop Proceedings. – 2022. – С. 66–82.

## References

1. Azhmukhamedov, I. M., Zavyalova, E. E., Kuznetsova, V. Yu. Methods for automating the analysis of textual information in Russian in order to identify its semantic orientation. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2020, no. 2 (50), pp. 118–126. EDN THMSQT.
2. Grigorieva, A. S. Optimization of the process of creating a standard draft document in order to increase labor productivity. *Bulletin of Science and Education*, 2017, no. 7 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-protsesta-sozdaniya-tipovogo-proekta-dokumenta-s-tselyu-povysheniya-proizvoditelnosti-truda> (accessed 02.25.2024).
3. Certificate of state registration of a computer program no. 2016619917 Russian Federation. Component for auto-generation of standard documents upon user request based on templates for the KONGRESS cloud information system: no. 2016615287; appl. 05.24.2016; publ. 01.09.2016. A. A. Dankovsky; applicant Limited Liability Company "Social Conference Technologies" (SKT LLC). EDN ZGCVBP.
4. Eresko, P. V. Creation and modification of templates for standard legal documents using computer software. *Bulletin of the Saratov State Academy of Law*, 2008, no. 6 (64), pp. 135–139. EDN JXLWDL.
5. Efimov, N. V. Automation of the creation of standard documents for information security in ISDN. *Information security: modern theory and practice : collection of scientific works of students, graduate students and*

teachers based on the materials of the III Interuniversity scientific-practical conference, Omsk, November 24, 2020. Executive editor Z. V. Semenov. Omsk, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), 2020, pp. 49–56. EDN BQZUTL.

6. Information security (Russia's market). URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Информационная\\_безопасность\\_\(рынок\\_России\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Информационная_безопасность_(рынок_России)) (accessed 29.02.2024).

7. Protalinsky, O. M., Azhmukhamedov, I. M. Information security of the university. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Technology and Information Science*, 2009, no. 1, pp. 18–23. EDN JWRBWN.

8. Protsenko, E. A. Organization and structure of information legislation in the system of ensuring information security in Russia. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2006, no. 32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-i-struktura-informatsionnogo-zakonodatelstva-v-sisteme-obespecheniya-informatsionnoy-bezopasnosti-rossii> (accessed 02.21.2024).

9. Ramensky, A. A. Web service for automating style settings and creating standard documents. *Youth scientific spring : proceedings of the L scientific and practical conference of young researchers of ZabSU, in 4 parts, Chita, April 10–14, 2023*. Rep. editor A. E. Celine. Chita, Transbaikalian State University, 2023, vol. 1, pp. 23–26. EDN KQTGQZ

10. Satlaykina, D. V. Robotization of the formation of standard documents with formatting control on the PIX RPA platform. *Eurasiascience : collection of articles of the LIII International scientific and practical conference, Moscow, May 15, 2023*. Moscow, Limited Liability Company “Actuality.RF”, 2023, p. 75–76. EDN FUGBLZ.

11. Sonin, P. V. Development of software for the automatic generation of standard documents. Information and telecommunication systems and technologies : proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, Kemerovo, October 11–13, 2018. Kemerovo, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2018, pp. 188–189. EDN VOLAZS.

12. Tokmakov, G. P. Development of a document publishing system based on SQL and XML technologies. *Automation of Management Processes*, 2008, no. 2, pp. 8–16. EDN MUYVCP.

13. Mi, L., Li, C., Du, P., Zhu, J., Yuan, X. and Li, Z. Construction and Application of an Automatic Document Generation Model. *2018 26th International Conference on Geoinformatics*. Kunming, China, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2018.8557127.

14. Zahorodko, P. V., Merzlykin, P. V. An approach for processing and document flow automation for Microsoft Word and LibreOffice Writer file formats. *CEUR Workshop Proceedings*, 2022, pp. 66–82.

Статья поступила в редакцию 27.02.2024; одобрена после рецензирования 29.02.2024; принята к публикации 29.02.2024.

The article was submitted 27.08.2023; approved after reviewing 29.02.2024; accepted for publication 29.02.2024.

## УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.89

### УПРАВЛЕНИЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ МОНИТОРИНГА: ОТРАСЛИ ПРИМЕНЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

**Борзин Роман Юрьевич**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. В.И. Ленина, 28, аспирант, ORCID: 0009-0004-6426-6649, e-mail: roma.borzin@mail.ru

**Кравец Алла Григорьевна**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. В.И. Ленина, 28, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-1675-8652, e-mail: AllaGKravets@yandex.ru

В данной статье представлены результаты систематического обзора литературы по проблемам управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга. Обзор включает в себя следующие этапы: формулировку вопроса исследования, поиск и отбор литературы, анализ данных и составление отчета. После отбора статей по критериям включения было выбрано 64 наиболее релевантных статьи. Результаты исследования представлены в виде диаграмм, таблиц и графиков. Анализ литературы позволил определить несколько основных проблем в управлении киберфизическими системами на основе данных мониторинга: проблемы безопасности, обработка больших объемов данных, сложность управления, недостаток стандартизации, необходимость быстрого реагирования. Также анализ позволил выделить методы и инструменты, используемые для решения проблем управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга.

**Ключевые слова:** киберфизические системы, мониторинг, анализ данных, управление, систематический обзор литературы

### CONTROL OF CYBERPHYSICAL SYSTEMS BASED ON THE ANALYSIS OF MONITORING DATA: APPLICATIONS, PROBLEMS AND METHODS OF THEIR SOLUTION

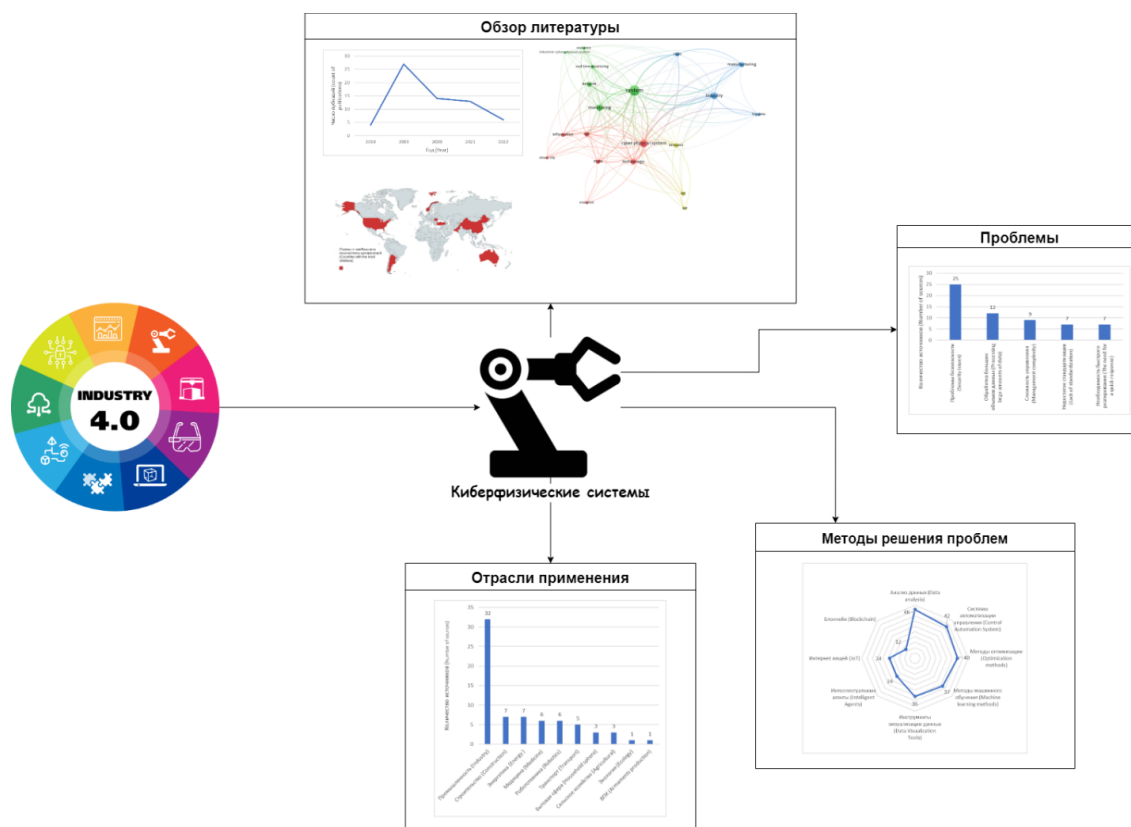
**Borzin Roman Yu.**, Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, graduate student, ORCID: 0009-0004-6426-6649, e-mail: roma.borzin@mail.ru

**Kravets Alla G.**, Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-1675-8652, e-mail: AllaGKravets@yandex.ru

This paper presents the results of a systematic review of the literature on the control of cyber-physical systems based on the analysis of monitoring data. The review includes the following steps: formulation of the research question, search and selection of literature, data analysis and preparation of a report. After selecting articles according to the inclusion criteria, 64 of the most relevant articles were selected. The results of the study are presented in the form of diagrams, tables and graphs. The analysis of the literature allowed us to identify several main problems in the control of cyber-physical systems based on monitoring data, such as: security problems, processing large amounts of data, complexity of management, lack of standardization, the need for rapid response. The analysis also made it possible to identify methods and tools used to solve the problems of control cyber-physical systems based on the analysis of monitoring data.

**Keywords:** cyber-physical systems, monitoring, data analysis, control, systematic mapping study

Graphical annotation (Графическая аннотация)



**ВВЕДЕНИЕ**

Управление киберфизическими системами (КФС) на основе анализа данных мониторинга – это область исследований, связанная с автоматизацией и оптимизацией процессов управления КФС с использованием данных мониторинга, полученных с датчиков и других источников.

КФС – это системы, в которых вычислительные и физические компоненты тесно интегрированы и взаимодействуют друг с другом в реальном времени [1]. Примерами КФС могут быть автономные транспортные средства, автоматизированные производственные линии, системы управления энергоснабжением и др.

Анализ данных мониторинга в КФС может включать в себя сбор и обработку данных, визуализацию результатов, выявление проблем и аномалий в работе системы, а также предложение решений для их устранения. Важным аспектом является автоматизация этого процесса, чтобы система могла быстро реагировать на изменения в окружающей среде и эффективно управляться.

Для управления КФС на основе анализа данных мониторинга используются различные методы и технологии, включая машинное обучение, искусственный интеллект, моделирование и симуляцию системы. Эти методы позволяют создавать более эффективные и надежные системы управления КФС, что может привести к улучшению производительности, экономии энергии и сокращению времени простоя систем.

Целью исследования является выделение отраслей применения, основных проблем и путей их решения в управлении киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести систематический анализ литературы о методах и моделях управления киберфизическими системами на основе данных мониторинга, выявить страны, заинтересованные в исследовании на данную тематику, выявить наиболее цитируемые источники.
2. Выявить основные отрасли применения киберфизических систем на основе данных мониторинга.
3. Выделить проблемы при разработке киберфизических систем.
4. Выявить методы решения проблем разработки киберфизических систем на основе данных мониторинга.

Таким образом, для выявления проблем управления КФС на основе анализа данных мониторинга необходимо провести систематический обзор литературы.

### СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для проведения систематического обзора литературы по проблемам управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга следует использовать актуальные и наиболее релевантные источники (опубликованные в 2018–2023 гг.).

Процесс систематического обзора литературы обычно состоит из следующих этапов (схематически эти этапы изображены на рисунке 1):

1. Формулировка вопроса исследования: определение конкретного вопроса, который требуется исследовать, и формулирование критериев включения/исключения исследований.
2. Поиск литературы: осуществление поиска наиболее подходящих исследований во всех доступных источниках, таких как базы данных, библиотеки, интернет-ресурсы.
3. Отбор литературы: проведение двухэтапного отбора исследований на основе критериев включения/исключения. На первом этапе исследования исключаются на основе заголовков и аннотаций, а на втором – на основе полного текста статьи.
4. Анализ данных: систематический анализ и синтез полученных данных с помощью качественного или количественного синтеза. Обычно результаты синтеза представляются в виде диаграмм, таблиц или графиков.
5. Составление отчета: написание подробного отчета о выполненном исследовании с описанием методологии, полученных результатов и выводов.



Рисунок 1 – Этапы систематического обзора литературы

В целом каждый из этих этапов является критически важным для успешного выполнения систематического обзора литературы.

#### ПОСТАНОВКА ВОПРОСОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Постановка вопросов – это процесс формулирования ясных, конкретных и понятных вопросов, которые помогают исследователю определить, что именно он ищет в своих исследованиях. Именно поэтому важно при постановке вопросов учитывать методы исследования, которые будут использоваться для их ответов, и тип данных, которые могут потребоваться для решения задачи.

При проведении систематического обзора литературы для изучения проблем управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга могут возникнуть следующие вопросы:

**ВИ1.** В каких отраслях могут быть использованы киберфизические системы?

**ВИ2.** Каковы основные проблемы управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга?

**ВИ3.** Какие методы и инструменты используются для решения проблем управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга?

#### ПОИСК И ОТБОР ЛИТЕРАТУРЫ

Следующим шагом после поставки вопросов является разработка строки поиска. Данная процедура необходима для выполнения систематического поиска соответствующих статей и публикаций в базах данных. Одной из таких баз является Google Scholar, которая была выбрана для поиска

литературы по причине того, что такие источники, как Scopus, на сегодняшний день недоступны, в то время как в Google Scholar есть возможность поиска иностранных источников.

Процесс создания поисковой строки и поиска литературы в Google Scholar включает несколько шагов:

Шаг 1: Определение ключевых слов.

Первым шагом является определение ключевых слов, которые будут использоваться для поиска. Эти ключевые слова должны отражать тему исследования и могут быть как отдельными словами, так и фразами. Ключевыми словами для текущего запроса являются: "cyber-physical system", "CPS", "domains", "applications", "industries", "management", "issues", "problems", "development", "dynamic environment", "monitoring", "algorithms", "methods", "optimization".

Шаг 2: Создание поисковой строки.

После определения ключевых слов следующим шагом является создание поисковой строки. Поисковая строка может состоять из одного или нескольких ключевых слов и должна быть структурированной таким образом, чтобы поиск был максимально точным и эффективным. Таким образом, поисковая строка может выглядеть следующим образом:

("cyber-physical system" OR "CPS") AND ("domains" OR "applications" OR "industries") AND ("management" OR "issues" OR "problems" OR "development" OR "dynamic environment") AND ("monitoring" OR "algorithms" OR "methods" OR "optimization").

Шаг 3: Запуск поиска.

После создания поисковой строки необходимо запустить поиск в Google Scholar. Поиск можно запустить на главной странице Google Scholar, где есть поле для ввода поисковой строки. После запуска поиска Google Scholar будет искать все публикации, которые соответствуют заданным ключевым словам.

Заданная строка в Google Scholar выдала 615000 результатов, что является слишком большим количеством для изучения и анализа. Для того чтобы получить более точные и конкретные результаты, поисковая строка была преобразована к следующему виду:

("cyber-physical system") AND ("manufacturing" OR "transportation" OR "energy" OR "health care" OR "ecology" OR "agriculture" OR "building") AND ("questions" OR "problems") AND ("development" OR "management") AND ("monitoring analysis").

Этот запрос должен уменьшить количество результатов и сузить их фокус на конкретных отраслях, проблемах и методах решения.

В результате сужения запроса на конкретные отрасли применения, проблемы и методы решения, а также фокусировки на анализе мониторинга, было получено 302 результата. Таким образом, уточнение запроса позволило сузить результаты поиска и сделать его более конкретным и узкоспециализированным.

### **ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИСТОЧНИКОВ**

В результате проведения систематического поиска в базах данных была получена выборка из 302 научных статей, связанных с темой исследования. Для повышения качества исследования и оптимизации времени, потраченного на анализ литературы, необходимо отобрать только те статьи, которые соответствуют критериям включения и исключения. Критериями включения будут являться следующие:

- дата публикации с 2018 по 2023 год;
- соответствие теме исследования ключевых слов и аннотации.

После отбора статей по заданным критериям, осталось 245 статей.

В ходе работы были проанализированы статьи с целью определения их соответствия цели и задачам исследования. Нерелевантные статьи, не содержащие достаточно информации или не относящиеся к теме исследования, были отсеяны. Для более тщательного отбора были выделены дополнительные критерии включения: актуальность, описание методов и алгоритмов, достоверность результатов и возможность применения в практических задачах.

В результате изучения оставшихся статей после применения сокращенного запроса было выбрано 64 наиболее релевантных статьи. Были отброшены неполные или недостаточно достоверные статьи в своих выводах и рекомендациях.

### **СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ**

В итоге 64 источника были проанализированы и признаны соответствующими задачам и цели исследования, что позволило использовать их результаты в дальнейшем анализе и обобщении результатов.

Рисунок 2 отображает распределение этих источников по годам, что позволяет проанализировать тенденцию роста числа публикаций в области киберфизических систем начиная с 2018 года. Рост числа публикаций в 2019 году свидетельствует о возрастающем интересе научного сообщества к данной теме. Одной из причин снижения числа публикаций в 2020–2021 годах, на наш взгляд, является пандемия коронавируса, так как основная часть исследований была направлена на борьбу с ее последствиями.

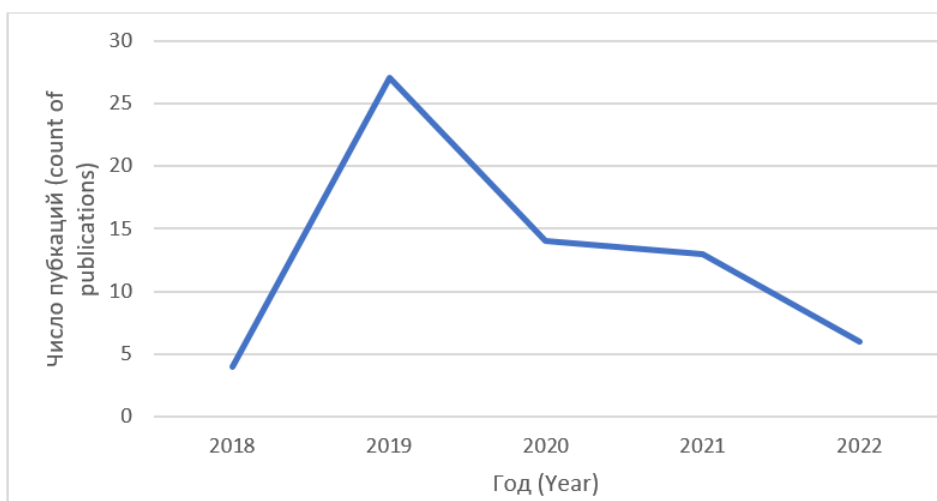


Рисунок 2 – Распределение источников по годам

Таблица 1 иллюстрирует распределение количество источников по странам и годам публикации. Стоит отметить, что тематика управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга интересует ученых в разных точках мира.

Таблица 1 – Распределение количества источников по странам и годам издания

Страна	Год издания	Количество источников
Россия	2018	1
	2019	19
	2020	7
	2021	5
	2022	4
Китай	2018	1
	2019	3
	2022	1
Швейцария	2020	1
	2021	2
Италия	2019	1
	2021	1
Румыния	2020	1
	2021	1
Австралия	2019	1
Аргентина	2018	1
Египет	2021	1
Испания	2021	1
Канада	2019	1
Мексика	2019	1
Нидерланды	2020	1
Норвегия	2020	1
Пакистан	2020	1
США	2018	1
Тайвань	2022	1
Турция	2020	1
Франция	2019	1
Чехия	2021	1
Чили	2021	1
Швеция	2020	1

Стоит отметить, что развитие киберфизических систем вовлекает все больше стран в совместные исследования этой тематики, но большинство источников, указанных выше, являются русскоязычными и уровень их цитирования значительно ниже. В таблице 2 приведен перечень статей с наиболее высоким уровнем цитирования. На рисунке 3 представлена карта мира с выделенными странами из таблицы, которая демонстрирует, что исследования на тему киберфизических систем распространены по всему миру.

Таблица 2 – Распределение источников по количеству цитирования

Авторы	Номер источника	Журнал, год	Авторы	Номер источника	Журнал, год
Oztemel E., Gursev S.	[2]	Journal of Intelligent Manufacturing, 2020	Springer	Турция	1798
Xu L., Duan L.	[14]	Enterprise Information Systems, 2019		Китай	554
Khan W. Z., Rehman M. H., Zangoti H. M., Afzal M. K., Armi N., Salah K.	[32]	Computers and Electrical Engineering, 2020	Elsevier Ltd	Пакистан	453
Ding D., Han Q. L., Wang Z., Ge X.	[4]	IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019		Австралия	419
Jiang Y., Yin S., Kaynak O.	[20]	IEEE Access, 2018		Китай	232
Andronic M., Lăzăroiu G., Iatagan M., Hurloiu I., Dijmărescu I.	[8]	Sustainability (Switzerland), 2021		Румыния	180
Yohanandhan R. V., Elavarasan R. M., Manoharan P., Mihet-Popa L.	[50]	IEEE Access, 2020		Норвегия	179
Yin S., Rodriguez-Andina J. J., Jiang Y.	[23]	IEEE Industrial Electronics Magazine, 2019		Китай	161
Saez M., Maturana F. P., Barton K., Tilbury D. M.	[7]	IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018		США	108
Caggiano A.	[15]	International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018		Аргентина	97

Рисунок 3 – Страны с наибольшим количеством цитирований

С использованием инструментария «VOSviewer» был проведен анализ ключевых слов, в результате чего была осуществлена оценка интенсивности использования одного термина с другим. Был составлен специальный тезаурус (1153 термина), чтобы объединить похожие термины и устранить опечатки в ключевых словах. Для построения наукометрической карты мы взяли только те ключевые слова, которые встречаются в выборке не менее 5 раз, сознательно исключая термины запроса, поскольку они присутствуют почти во всех документах и искажают кластеризацию. Таким образом, окончательный выбор ключевых слов состоит из 20 терминов. Визуализация результатов представлена на рисунке 1, где размер объекта отражает его общую силу связей («total link strength»), а ширина линий – силу связи («link strength»).

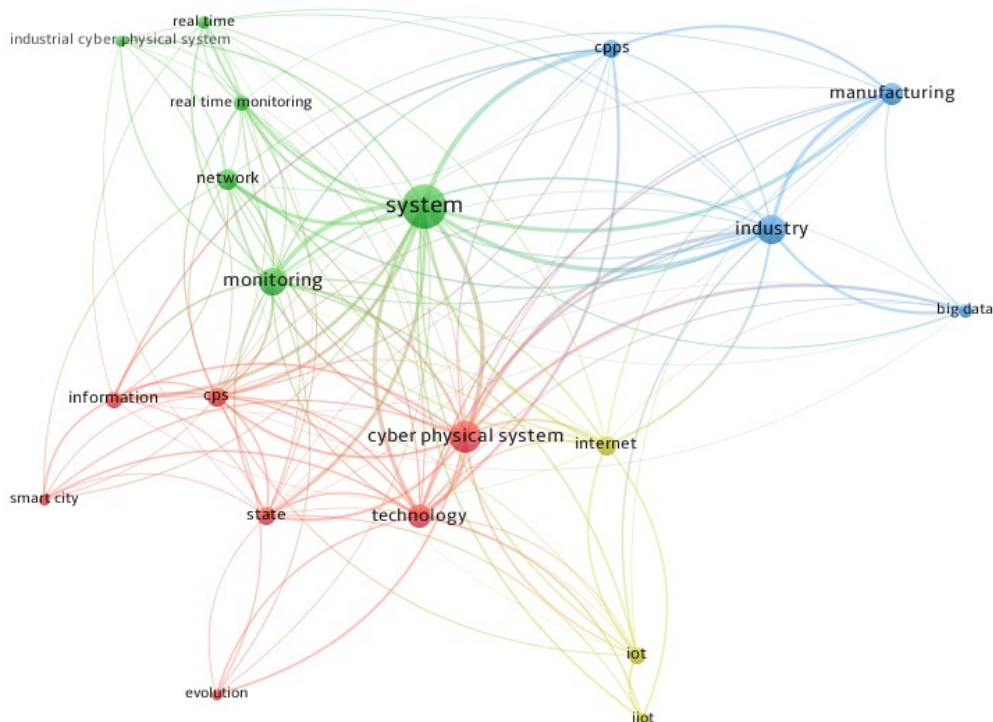


Рисунок 4 – Кластеризация сети совпадения ключевых слов в VOSviewer

Анализ позволяет выделить несколько кластеров, которые можно условно обозначить как «Система» (зеленый), «Интернет вещей» (желтый), «Промышленность» (синий) и «Киберфизические системы» (красный). Интерпретация кластеров основана на встречающихся в них ключевых словах, однако следует отметить, что данное разделение довольно условно, поскольку и кластеры, и термины взаимосвязаны.

#### ОТРАСЛИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В таблице 3 представлен ответ на **ВИ1** (В каких отраслях могут быть использованы киберфизические системы?).

Исследование, основанное на обзоре научных публикаций, выявило главные отрасли, в которых широко используются киберфизические системы. Результаты анализа представлены на графике (рис. 5), показывающем распределение данных.

Таблица 3 – В каких отраслях могут быть использованы киберфизические системы?

Отрасль	Процент от общего числа источников	Ссылки
Промышленность	50 % (32)	[2–33]
Строительство	11 % (7)	[7, 9, 11, 56–59]
Энергетика	11 % (7)	[7, 9, 16, 26–28, 33]
Медицина	9 % (6)	[28–30, 55–57]
Робототехника	9 % (6)	[28–30, 58–60]
Транспорт	8 % (5)	[28–30, 50, 61]
Бытовая сфера	5 % (3)	[29–30, 62]
Сельское хозяйство	5 % (3)	[29–30, 50]
Экология	2 % (1)	[63]
ВПК	2 % (1)	[64]

Исследование показало, что промышленность, строительство и энергетика являются наиболее важными отраслями, где киберфизические системы находят широкое применение. Промышленность занимает лидирующую позицию в числе пользователей киберфизических систем благодаря возрастающей потребности в автоматизации и оптимизации производственных процессов.

Строительство и энергетика занимают следующие позиции в списке из-за важности повышения эффективности и безопасности операций в этих отраслях. Кроме того, киберфизические системы также находят применение в других областях, таких как экология, робототехника, медицина, транспорт и сельское хозяйство. Однако эти отрасли на данный момент не столь подробно исследованы, как промышленность, строительство и энергетика.

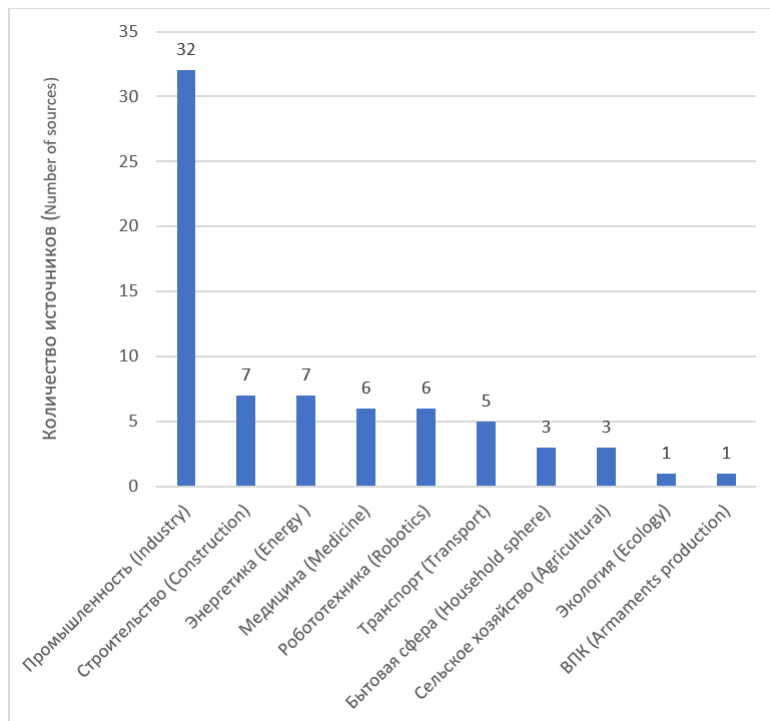


Рисунок 5 – Сравнение количества источников по отраслям применения киберфизических систем

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

В таблице 4 представлен ответ на **ВИ2** (Каковы основные проблемы управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга?). В данной таблице представлены все источники, у которых возможно было выделить основную проблему.

Таблица 4 – Каковы основные проблемы управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга?

Основная проблема	Процент от общего числа	Ссылки
Проблемы безопасности	39 % (25)	[4, 19–25, 28–30, 33, 40, 43, 44, 50–54, 56, 58, 61, 65]
Обработка больших объемов данных	19 % (12)	[14–19, 29–30, 33, 49, 56–57]
Сложность управления	14 % (9)	[4, 19, 26–27, 29–30, 40, 57]
Недостаток стандартизации	11 % (7)	[2–4, 19, 30, 33, 57]
Необходимость быстрого реагирования	11 % (7)	[4, 19, 29, 30–31, 41, 64]
Нет четкой проблемы	6 % (4)	[6, 12, 34, 47]

В управлении киберфизическими системами выделяются различные проблемы, которые могут влиять на их работу и развитие. На основе анализа литературы были выявлены следующие основные проблемы, распределение которых показано на рисунке 6.

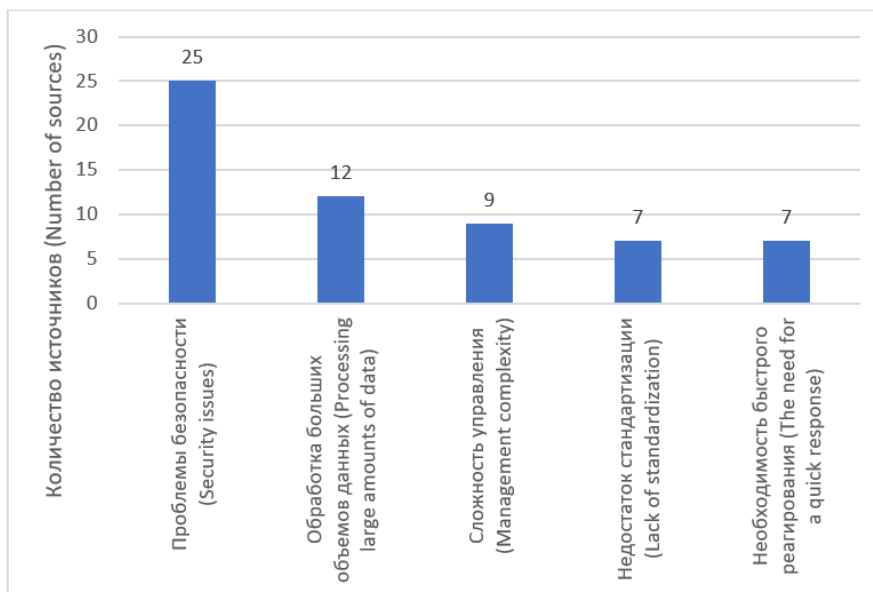


Рисунок 6 – Сравнение источников по проблемам управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга

В научных исследованиях были выявлены несколько основных проблем, связанных с применением киберфизических систем:

1. Прежде всего большие объемы данных, получаемые с датчиков киберфизических систем, требуют использования методов машинного обучения и искусственного интеллекта для их обработки и классификации.

2. Второй проблемой является отсутствие универсальных стандартов для сбора, хранения и обработки данных, что затрудняет интеграцию систем и обмен информацией между ними.

3. Третья проблема связана с безопасностью киберфизических систем, так как кибератаки и другие угрозы могут негативно влиять на работу системы, и требует разработки мер защиты данных и системы в целом.

4. Кроме того, киберфизические системы должны быстро реагировать на изменения в окружающей среде в режиме реального времени, что требует использования методов анализа данных и обработки информации.

5. Наконец, управление киберфизическими системами может быть очень сложным и требовать большой вычислительной мощности, поэтому необходимо использовать специальные алгоритмы и методы для оптимизации процессов управления и повышения эффективности работы системы.

#### **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ КИБЕРФИЗИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ МОНИТОРИНГА**

В таблице 5 представлен ответ на **ВИЗ** (Какие методы и инструменты используются для решения проблем управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга?), диаграмма распределения методов решения проблем киберфизических систем представлена на рисунке 7.

В условиях динамической изменчивости окружающей среды управление киберфизическими системами является сложной задачей, которая требует постоянного мониторинга и адаптивности. Изучая литературу, можно выделить четыре основных метода решения проблем управления киберфизическими системами в таких условиях.

Таблица 5 – Какие методы и инструменты используются для решения проблем управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга?

Решение	Процент от общего числа источников	Ссылки
Анализ данных	72 % (46)	[2–9, 11–20, 22, 24, 25–27, 29–33, 36–38, 40, 44, 46, 49–57, 60–62, 65]
Системы автоматизации управления	66 % (42)	[3, 4, 7, 9–12, 15, 18–26, 29–32, 34, 36–39, 41, 44–46, 48, 50, 53–62, 64]
Методы оптимизации	63 % (40)	[2–7, 10–19, 21, 23, 26–27, 29–30, 33, 36–37, 38–41, 45, 47–48, 50, 55–56, 58, 60–62, 64, 65]
Методы машинного обучения	58 % (37)	[2, 8–11, 15–18, 20–22, 24–33, 36–38, 40, 44, 50–54, 57, 60–63]
Инструменты визуализации данных	56 % (36)	[2, 4, 6, 9–10, 12–14, 16–19, 22, 24, 26, 29–32, 36–40, 44–46, 48–50, 54, 59–62, 65]
Интеллектуальные агенты	38 % (24)	[2, 10–12, 16, 18, 21, 23, 27, 29, 30, 33, 36–40, 45, 50, 53, 58, 60, 62, 65]
Интернет вещей (IoT)	38 % (24)	[2–3, 5–8, 10, 13, 17, 19, 22, 24–25, 29–30, 32, 34, 38, 47, 53, 55, 60, 63, 65]
Блокчейн	19 % (12)	[2, 5, 24, 28–31, 38–39, 44, 56, 60]

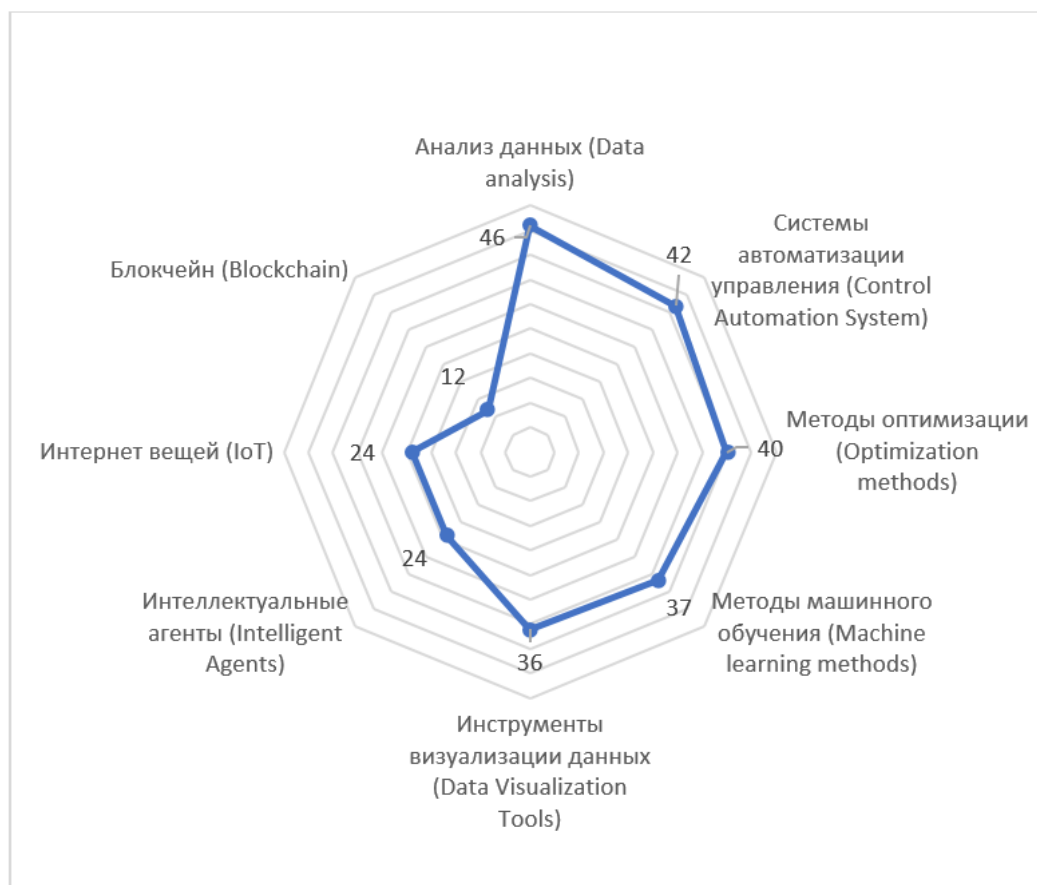


Рисунок 7 – Сравнение количества источников по методам решения проблем киберфизических систем

Методы машинного обучения (Machine Learning) – это область искусственного интеллекта, изучающая алгоритмы, которые могут обучаться на основе данных и использовать эти знания для принятия решений. Методы машинного обучения включают в себя различные подходы, такие как нейронные сети, деревья решений, метод опорных векторов, байесовские сети и многое другое.

Анализ данных (Data Analysis) – это процесс извлечения, преобразования, очистки и моделирования данных с целью извлечения полезной информации. Анализ данных используется в различных областях, включая науку о данных, бизнес-аналитику, маркетинг, финансы и многое другое.

Методы оптимизации (Optimization Methods) – это набор алгоритмов и методов, которые используются для поиска оптимальных решений в различных задачах. Они могут быть использованы для решения задач оптимизации в различных областях, таких как экономика, инженерия, наука о данных и многое другое.

Интеллектуальные агенты (Intelligent Agents) – это компьютерные программы, которые могут автономно выполнять задачи, включая сбор и анализ информации, принятие решений и выполнение действий. Интеллектуальные агенты используются в различных областях, включая робототехнику, машинное зрение, автоматизацию и многое другое.

Инструменты визуализации данных (Data Visualization Tools) – это программные средства, которые позволяют представлять данные в виде графиков, диаграмм и других визуальных форматов. Инструменты визуализации данных используются для анализа и представления информации в различных областях, таких как наука о данных, бизнес-аналитика и многое другое.

Блокчейн (Blockchain) – это распределенная база данных, которая используется для записи транзакций и хранения информации. Блокчейн используется в различных областях, включая финансы, медицину, правительственные службы и многое другое.

Интернет вещей (Internet of Things, IoT) – это концепция, которая описывает сеть физических устройств, подключенных к интернету и способных обмениваться данными между собой. IoT используется в различных областях, включая умный дом, умный город, здравоохранение, производство и многое другое.

Системы автоматизации управления (Automation Control Systems) – это комплексные системы, которые используются для автоматизации различных процессов и задач. Они используются в различных областях, включая производство, энергетику, транспорт и многое другое. Системы автоматизации управления включают в себя различные подсистемы, такие как системы управления процессами, системы управления технологическими объектами, системы управления энергопотреблением и многое другое.

В результате можно отметить, что каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки и для эффективного решения проблем управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга может потребоваться комбинация нескольких методов.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, после проведения анализа иностранной и отечественной литературы можно сделать вывод, что киберфизические системы применимы во многих сферах жизнедеятельности людей, но большую долю внедрения на себя берет производство.

Также выявлена основная проблема использования киберфизических систем – это безопасность. Внешние воздействия могут негативно влиять на работу системы, что требует разработки мер защиты данных и системы в целом.

В 75 % изученной литературы предлагалась комбинация методов, используемых для решения проблем управления киберфизическими системами на основе анализа данных мониторинга. Однако, по данным исследования, наибольшее внимание уделяется методам анализа данных и системам автоматизации управления, в то время как Интернет вещей (IoT) и блокчейн упоминаются в меньшей степени [1].

### **Список источников**

1. Tiwari, D. D. Attack Detection Using Unsupervised Learning Algorithms in Cyber-Physical Systems / D. D. Tiwari, S. Naskar, A. S. Sai, V. R. Palleti // *Computer Aided Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 50.
2. Oztemel, E. Literature Review of Industry 4.0 and Related Technologies / E. Oztemel, S. Gursev // *J. Intell. Manuf.* – 2020. – Vol. 31. – P. 127–182.
3. Толкачев, С. А. Киберфизические компоненты повышения конкурентоспособности обрабатывающих отраслей промышленности / С. А. Толкачев // *Экономическое возрождение России*. – 2019. – № 3. – С. 127–145.
4. Ding, D. A Survey on Model-Based Distributed Control and Filtering for Industrial Cyber-Physical Systems / D. Ding, Q. L. Han, Z. Wang, X. Ge // *IEEE Trans. Industr. Inform.* – 2019. – Vol. 15.
5. Suvarna, M. Cyber-Physical Production Systems for Data-Driven, Decentralized, and Secure Manufacturing – A Perspective / M. Suvarna, K.S. Yap, W. Yang, J. Li, Y. T. Ng, X. Wang // *Engineering*. – 2021. – Vol. 7.
6. Stehel, V. Cyber-Physical System-Based Real-Time Monitoring, Industrial Big Data Analytics, and Smart Factory Performance in Sustainable Manufacturing Internet of Thing / V. Stehel, C. Bradley, P. Suler, S. Bilan // *Economics, Management, and Financial Markets*. – 2021. – Vol. 16.
7. Saez, M. Real-Time Manufacturing Machine and System Performance Monitoring Using Internet of Things / M. Saez, F. P. Maturana, K. Barton, D. M. Tilbury // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 15.

8. Andronic, M. Sustainable Cyber-Physical Production Systems in Big Data-Driven Smart Urban Economy: A Systematic Literature Review / M. Andronic, G. Lăzăroiu, M. Iatagan, I. Hurloiu, I. Dijmărescu // *Sustainability* (Switzerland). – 2021. – Vol. 13.
9. Тынченко, В. С. Исследование методов автоматизированной обработки диагностических данных для киберфизических производственных систем / В. С. Тынченко, Н. А. Бухтоярова // *Перспективы науки*. – 2019. – № 12. – С. 75–77.
10. Любименко, Д. А. Методический подход к оценке эффективности инжиниринговых проектов внедрения киберфизических систем в деятельность промышленных предприятий / Д. А. Любименко, Е. Д. Вайсман, Экономика. Информатика. – 2021. – № 48.
11. Борзин, Р. Ю. Обзор проблем управления киберфизическими системами на основе анализа мониторинга внешней среды / Р. Ю. Борзин, А. Г. Кравец // *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты*. – 2022. – С. 457–461.
12. Николаев, И. С. Роль человека в Индустрии 4.0 и ее перспективы / И. С. Николаев, В. В. Воронов, С. А. Шияев // *Sciences of Europe*. – 2021. – № 62. – С. 49–56.
13. Исаенко, Д. И. Система сбора и отображения данных сенсоров киберфизической системы с применением дополненной реальности / Д. И. Исаенко, Е. А. Логвинова, А. В. Никитин, Б. К. Резников, А. В. Пачин, Р. В. Киричек // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2022. – № 2. – С. 34–41.
14. Xu, L. Da, Duan, L. Big Data for Cyber Physical Systems in Industry 4.0: A Survey / L. Da Xu, L. Duan // *Enterpr. Inf. Syst.* – 2019. – Vol. 13.
15. Caggiano, A. Cloud-Based Manufacturing Process Monitoring for Smart Diagnosis Services / A. Caggiano // *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* – 2018. – Vol. 31.
16. Cohen, S. Cyber-Physical Process Monitoring Systems, Real-Time Big Data Analytics, and Industrial Artificial Intelligence in Sustainable Smart Manufacturing / S. Cohen, J. Macek // *Economics, Management, and Financial Markets*. – 2021. – Vol. 16.
17. Mörth, O. Cyber-Physical Systems for Performance Monitoring in Production Intralogistics / O. Mörth, C. Emmanouilidis, N. Hafner, M. Schadler // *Comput. Ind. Eng.* – 2020. – Vol. 142.
18. Бухтояров, В. В. Анализ диагностической информации в киберфизической производственной системе / В. В. Бухтояров, В. С. Тынченко, Н. А. Бухтоярова // *Перспективы науки*. – 2019. – № 12. – С. 72–74.
19. Nica, E. Smart Connected Sensors, Industrial Big Data, and Real-Time Process Monitoring in Cyber-Physical System-Based Manufacturing / E. Nica, K. Janoskova, M. Kovacova // *Journal of Self-Governance and Management Economics*. – 2020. – Vol. 8.
20. Jiang, Y. Data-Driven Monitoring and Safety Control of Industrial Cyber-Physical Systems: Basics and Beyond / Y. Jiang, S. Yin, O. Kaynak // *IEEE Access*. – 2018. – Vol. 6.
21. Kravets, A. G. Industrial Cyber-Physical Systems: Risks Assessment and Attacks Modeling / A. G. Kravets, N. Salnikova, K. Dmitrenko, M. Lempert // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2020. – Vol. 260.
22. Semenov, V. V. Method for Monitoring the State of Elements of Cyber-Physical Systems Based on Time Series Analysis / V. V. Semenov // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2022. – Vol. 22.
23. Yin, S. Real-Time Monitoring and Control of Industrial Cyberphysical Systems: With Integrated Plant-Wide Monitoring and Control Framework / S. Yin, J. J. Rodriguez-Andina, Y. Jiang // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. – 2019. – Vol. 13.
24. Бурлов, В. Г. Индустрия 4.0. Угрозы и требования к процессу управления обеспечением информационной безопасности киберфизических систем / В. Г. Бурлов, Е. С. Грозмани, С. В. Петров, С. Ю. Капицын, С. А. Веревкин // *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. – 2019. – № 3. – С. 126–129.
25. Полтавцева, М. А. Модель активного мониторинга как основа управления безопасностью промышленных киберфизических систем / М. А. Полтавцева // *Вопросы кибербезопасности*. – 2021. – № 2. – С. 51–60.
26. Jwo, J. S. Data Twin-Driven Cyber-Physical Factory for Smart Manufacturing / J. S. Jwo, C. H. Lee, C. S. Lin // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22.
27. Круглова, Т. Н. Интеллектуальное принятие решения в киберфизической системе диагностирования электродвигателей технологического оборудования / Т. Н. Круглова // *Вестник УГАТУ*. – 2019. – № 23. – С. 97–103.
28. Башелханов, И. В. Обеспечение информационной безопасности в киберфизических системах в условиях Индустрии 4.0 / И. В. Башелханов, Н. И. Демкина, С. М. Володин, А. В. Рой, А. В. Олескин, В. Н. Решетников // *Информационная безопасность: вчера, сегодня, завтра* : сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 153–160.
29. Ковалёв, С. П. Алгебраические Методы Проектирования гетерогенных киберфизических систем / С. П. Ковалёв // *Математические методы в технологиях и технике*. – 2021. – № 2. – С. 144–147.
30. Львович, Я. Е. Киберфизические системы – основные направления развития / Я. Е. Львович, А. П. Преображенский, Ю. П. Преображенский // *Вестник Воронежского института высоких технологий*. – 2022. – № 2. – С. 90–92.
31. Aqueveque, P. Development of a Cyber-Physical System to Monitor Early Failures Detection in Vibrating Screens / P. Aqueveque, L. Radrigan, A. S. Morales, E. Willenbrinck // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9.
32. Khan, W. Z. Industrial Internet of Things: Recent Advances, Enabling Technologies and Open Challenges / W. Z. Khan, M. H. Rehman, H. M. Zangoti, M. K. Afzal, N. Armi, K. Salah // *Computers and Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 81.
33. Смышляева, А. А. Современные технологии в Индустрии 4.0 – киберфизические системы / А. А. Смышляева, К. М. Резникова, Д. В. Савченко // *Отходы и ресурсы*. – 2020. – № 7.

34. Фрадков, А. Л. Киберфизические системы: идеи и перспективы / А. Л. Фрадков // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019 / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2019. – Т. 39.
35. Ощепков, А. М. Кибер-физическая система как результат эволюции организаций / А. М. Ощепков // Актуальные вопросы современной экономики. – 2019. – № 6–2. – С. 227–234.
36. Пыркин, А. А. Новые методы построения адаптивных наблюдателей для киберфизических систем / А. А. Пыркин, А. А. Бобцов, Р. Ортега // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2019. – С. 1435–1436.
37. Сольнищев, Р. И. Об инструментации проектирования и производства киберфизических систем / Р. И. Сольнищев, Г. И. Коршунов // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 6. – С. 102–107.
38. Городецкий, В. И. Цифровая платформа киберфизических систем / В. И. Городецкий П. О. Скобелев // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2019. – С. 2339–2344.
39. Clauberg, R. Cyber-Physical Systems and Artificial Intelligence: Chances and Threats to Modern Economies / R. Clauberg // World civilizations. – 2020. – № 3–4. – P. 107–115.
40. Ватаманюк, И. В. Обобщенные теоретические модели киберфизических систем / И. В. Ватаманюк, Р. Н. Яковлев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2019. – № 23. – С. 161–175.
41. Соколов, Б. В. Совместное оперативное планирование измерительных и вычислительных операций в киберфизических системах / Б. В. Соколов, В. В. Захаров, Д. И. Назаров // Научное приборостроение. – 2020. – № 3. – С. 49–62.
42. Новосельский, Н. К. Перспективы развития киберфизических систем в Российской Федерации / Н. К. Новосельский, Д. С. Гяделов, А. А. Рагозин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2021. – № 2. – С. 984–986.
43. Добычина, А. В. Исследование протоколов передачи данных в киберфизических системах / А. В. Добычина, С. В. Акимов // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО : XLVII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО. – 2018. – С. 45–48.
44. Кулагина, И. В. Моделирование практик агрессии в социо-киберфизической среде / И. В. Кулагина, А. О. Исхакова, Р. П. Галин // Вестник Томского государственного университета Философия. Социология. Политология. – 2019. – № 52. – 147–161.
45. Bonci, A. A Cyber-Physical System Approach for Building Efficiency Monitoring / A. Bonci, A. Carbonari, A. Cucchiarelli, L. Messi, M. Pirani, M. Vaccarini // Autom. Constr. – 2019. – Vol. 102.
46. Liu, G. Cyber-Physical System-Based Real-Time Monitoring and Visualization of Greenhouse Gas Emissions of Prefabricated Construction / G. Liu, H. Yang, Y. Fu, C. Mao, P. Xu, J. Hong, R. Li // J. Clean. Prod. – 2020. – Vol. 246.
47. Loubet, G. LoRaWAN Battery-Free Wireless Sensors Network Designed for Structural Health Monitoring in the Construction Domain / G. Loubet, A. Takacs, E. Gardner, A. De Luca, F. Udrea, D. Dragomirescu // Sensors. – 2019. – № 19.
48. Чельшков, П. Д. Распределенное моделирование строительных систем посредством киберфизической интеграции / П. Д. Чельшков // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 9. – С. 12–17.
49. Насонов, Е. И. Киберфизические системы в строительной отрасли / Е. И. Насонов, Е. В. Макиша // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1.
50. Yohanandhan, R. V. Cyber-Physical Power System (CPPS): A Review on Modeling, Simulation, and Analysis with Cyber Security Applications / R. V. Yohanandhan, R. M. Elavarasan, P. Manoharan, L. Mihet-Popa // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8.
51. Li, Q. Safety Risk Monitoring of Cyber-Physical Power Systems Based on Ensemble Learning Algorithm / Q. Li, S. Meng, S. Zhang, M. Wu, J. Zhang, M. Ahvanooy Taleby, M. S. Aslam // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7.
52. Elsis, M. Reliable Industry 4.0 Based on Machine Learning and IOT for Analyzing, Monitoring, and Securing Smart Meters / M. Elsis, K. Mahmoud, M. Lehtonen, M. M. F. Darwish // Sensors. – 2021. – Vol. 21.
53. Мокрова, Н. В. Концептуальный подход к проблематике умных городов / Н. В. Мокрова // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 7. – С. 32–40.
54. Нашивочников, Н. В. Проблемные вопросы применения аналитических средств безопасности киберфизических систем предприятий ТЭК / Н. В. Нашивочников, А. А. Большаков, Ю. А. Николашин, А. А. Лукашин // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 5. – С. 26–33.
55. Arafsha, F. Cyber-Physical System Framework for Measurement and Analysis of Physical Activities / F. Arafsha, F. Laamarti, A. El Saddik // Electronics. – 2019. – Vol. 8.
56. Chen, F. Medical Cyber-Physical Systems: A Solution to Smart Health and the State of the Art / F. Chen, Y. Tang, C. Wang, J. Huang, C. Huang, D. Xie, T. Wang, C. Zhao // IEEE Trans. Comput. Soc. Syst. – 2022. – Vol. 9.
57. Никольский, Е. А. Кибер-физическое моделирование с использованием brain-computer interface в задачах нейрореабилитационной медицины / Е. А. Никольский, Е. В. Петрунина // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. междунар. науч. конф. : в 12 т. – 2019. – С. 115–120.
58. Изотова, В. Ф. Проблемы правового регулирования искусственного интеллекта киберфизических систем и робототехники / В. Ф. Изотова // Проблемы и вызовы цифрового общества: тенденции развития правового регулирования цифровых трансформаций : сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 125–127.
59. Громаков, Е. И. Киберфизическое управление сортировкой фрагментов рисунка картины / Е. И. Громаков, А. Ю. Зарницын, А. В. Цавнин, С. В. Леонов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 12. – С. 575–582.

60. Гордиенко, В. В. Проблемы внедрения искусственного интеллекта цифровых технологий в современную правовую систему / В. В. Гордиенко, Р. В. Глаголев // Auditorium. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2020. – № 1.

61. Семенов, В. В. Выявление аномальных отклонений при функционировании устройств киберфизических систем / В. В. Семенов, К. И. Салахутдинова, И. С. Лебедев, М. Е. Сухопаров // Прикладная информатика. – 2019. – № 14. – С. 114–122.

62. Пустохина, И. В. Массовое производство на основе автономных (киберфизических) производственных систем / И. В. Пустохина, А. М. Жигалов // Система менеджмента качества: опыт и перспективы. – 2020. – № 9. – С. 304–307.

63. Monedero, Í. Cyber-Physical System for Environmental Monitoring Based on Deep Learning / Í. Monedero, J. Barbancho, R. Márquez, J. F. Beltrán // Sensors. – 2021. – Vol. 21.

64. Курбанов, А. Х. Экономические аспекты создания и функционирования киберфизических производственно-логистических систем / А. Х. Курбанов, А. В. Соболев // Теория и практика экономики и предпринимательства : XVI Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция. – 2019. – С. 33–35.

65. Puliafito, A. Smart Cities of the Future as Cyber Physical Systems: Challenges and Enabling Technologies / A. Puliafito, G. Tricomi, A. Zafeiropoulos, S. Papavassiliou // Sensors. – 2021. – Vol. 21.

### References

1. Tiwari, D. D., Naskar, S., Sai, A. S., Palleti, V. R. Attack Detection Using Unsupervised Learning Algorithms in Cyber-Physical Systems. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2021, vol. 50.

2. Oztemel, E., Gursev, S. Literature Review of Industry 4.0 and Related Technologies. *J. Intell. Manuf.*, 2020, vol. 31, pp. 127–182.

3. Tolkachev, S. A. Cyberphysical components of increasing the competitiveness of manufacturing industries. *Economic Revival of Russia*, 2019, no. 3, pp. 127–145.

4. Ding, D., Han, Q. L., Wang, Z., Ge, X. A Survey on Model-Based Distributed Control and Filtering for Industrial Cyber-Physical Systems. *IEEE Trans. Industr. Inform.*, 2019, vol. 15.

5. Suvarna, M., Yap, K. S., Yang, W., Li, J., Ng, Y. T., Wang, X. Cyber-Physical Production Systems for Data-Driven, Decentralized, and Secure Manufacturing – A Perspective. *Engineering*, 2021, vol. 7.

6. Stehel, V., Bradley, C., Suler, P., Bilan, S. Cyber-Physical System-Based Real-Time Monitoring, Industrial Big Data Analytics, and Smart Factory Performance in Sustainable Manufacturing Internet of Things. *Economics, Management, and Financial Markets*, 2021, vol. 16.

7. Saez, M., Maturana, F. P., Barton, K., Tilbury, D. M. Real-Time Manufacturing Machine and System Performance Monitoring Using Internet of Things. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, vol. 15.

8. Andronic, M., Lăzăroiu, G., Iatagan, M., Hurloiu, I., Dijmărescu, I. Sustainable Cyber-Physical Production Systems in Big Data-Driven Smart Urban Economy: A Systematic Literature Review. *Sustainability (Switzerland)*, 2021, vol. 13.

9. Tynchenko, V. S., Bukhtoyarova, N. A. Study of methods for automated processing of diagnostic data for cyber-physical production systems. *Perspectives of Science*, 2019, no. 12, P. 75–77.

10. Lyubimenko, D. A., Vaisman, E. D. Methodological approach to assessing the effectiveness of engineering projects for the implementation of cyber-physical systems in the activities of industrial enterprises. *Economics. Computer Science*, 2021, no. 48.

11. Borzin, R. Yu., Kravets, A. G. Review of problems of managing cyberphysical systems based on analysis of monitoring the external environment. *Fundamental, search, applied research and innovative projects*, 2022, pp. 457–461.

12. Nikolaev, I. S., Voronov, V. V., Shilyaev, S. A. The role of man in Industry 4.0 and its prospects. *Sciences of Europe*, 2021, no. 62, pp. 49–56.

13. Isaenko, D. I., Logvinova, E. A., Nikitin, A. V., Reznikov, B. K., Pachin, A. V., Kirichek, R. V. System for collecting and displaying data from sensors of a cyberphysical system using augmented reality. *Infocommunication technologies*, 2022, no. 2, pp. 34–41.

14. Xu, L. Da, Duan, L. Big Data for Cyber Physical Systems in Industry 4.0: A Survey. *Enterp. Inf. Syst.*, 2019, vol. 13.

15. Caggiano, A. Cloud-Based Manufacturing Process Monitoring for Smart Diagnosis Services. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, 2018, vol. 31.

16. Cohen, S., Macek, J. Cyber-Physical Process Monitoring Systems, Real-Time Big Data Analytics, and Industrial Artificial Intelligence in Sustainable Smart Manufacturing. *Economics, Management, and Financial Markets*, 2021, vol. 16.

17. Mörth, O., Emmanouilidis, C., Hafner, N., Schadler, M. Cyber-Physical Systems for Performance Monitoring in Production Intralogistics. *Comput. Ind. Eng.*, 2020, vol. 142.

18. Bukhtoyarov, V. V., Tynchenko, V. S., Bukhtoyarova, N. A. Analysis of diagnostic information in a cyber-physical production system. *Perspectives of Science*, 2019, no. 12, pp. 72–74.

19. Nica, E., Janoskova, K., Kovacova, M. Smart Connected Sensors, Industrial Big Data, and Real-Time Process Monitoring in Cyber-Physical System-Based Manufacturing. *Journal of Self-Governance and Management Economics*, 2020, vol. 8.

20. Jiang, Y., Yin, S., Kaynak, O. Data-Driven Monitoring and Safety Control of Industrial Cyber-Physical Systems: Basics and Beyond. *IEEE Access*, 2018, vol. 6.

21. Kravets, A. G., Salnikova, N., Dmitrenko, K., Lempert, M. Industrial Cyber-Physical Systems: Risks Assessment and Attacks Modeling. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2020, vol. 260.

22. Semenov, V. V. Method for Monitoring the State of Elements of Cyber-Physical Systems Based on Time Series Analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22.

23. Yin, S., Rodriguez-Andina, J. J., Jiang, Y. Real-Time Monitoring and Control of Industrial Cyberphysical Systems: With Integrated Plant-Wide Monitoring and Control Framework. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2019, vol. 13.

24. Burlov, V. G., Grozmani, E. S., Petrov, S. V., Kapitsyn, S. Yu. Verevkin, S. A. Industry 4.0. Threats and requirements for the process of managing information security of cyberphysical systems. *Information Technologies and Systems: Management, Economics, Transport, Law*, 2019, no. 3, pp. 126–129.
25. Poltavtseva, M. A. Model of active monitoring as the basis for managing the security of industrial cyber-physical systems. *Issues of Cybersecurity*, 2021, no. 2, pp. 51–60.
26. Jwo, J. S., Lee, C. H., Lin, C. S. Data Twin-Driven Cyber-Physical Factory for Smart Manufacturing. *Sensors*, 2022, vol. 22.
27. Kruglova, T. N. Intelligent decision making in a cyberphysical system for diagnosing electric motors of technological equipment. *Bulletin of UGATU*, 2019, no. 23, pp. 97–103.
28. Bachelkhanov, I. V., Demkina, N. I., Volodin, S. M., Roy, A. V., Oleskin, A. V., Reshetnikov, V. N. Ensuring information security in cyber-physical systems in the conditions of Industry 4.0. *Information security: yesterday, today, tomorrow : collection of articles based on the materials of the International scientific and practical conference*, 2019, pp. 153–160.
29. Kovalev, S. P. Algebraic Methods for Designing Heterogeneous Cyber-Physical Systems. *Mathematical methods in technology and engineering*, 2021, no. 2, pp. 144–147.
30. Lvovich, Ya. E., Preobrazhensky, A. P., Preobrazhensky, Yu. P. Cyberphysical systems – main directions of development. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*, 2022, no. 2, pp. 90–92.
31. Aqueveque, P., Radrigan, L., Morales, A. S., Willenbrinck, E. Development of a Cyber-Physical System to Monitor Early Failures Detection in Vibrating Screens. *IEEE Access*, 2021, vol. 9.
32. Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., Salah, K. Industrial Internet of Things: Recent Advances, Enabling Technologies and Open Challenges. *Computers and Electrical Engineering*, 2020, vol. 81.
33. Smyshlyayeva, A. A., Reznikova, K. M., Savchenko, D. V. Modern technologies in Industry 4.0 – cyber-physical systems. *Waste and resources*, 2020, no. 7.
34. Fradkov, A. L. Cyberphysical systems: ideas and prospects. *Collection of proceedings of the XIII All-Russian meeting on management problems VSPU-2019. Institute of Management Problems named after V.A. Trapeznikov RAS*, 2019, vol. 39.
35. Oshchepkov, A. M. Cyber-physical system as a result of the evolution of organizations. *Current Issues of Modern Economics*, 2019, no. 6–2, pp. 227–234.
36. Pyrkin, A. A., Bobtsov, A. A., Ortega, R. New methods for constructing adaptive observers for cyber-physical systems. *Collection of proceedings of the XIII All-Russian meeting on management problems VSPU-2019. Institute of Management Problems named after V.A. Trapeznikov RAS*, 2019, pp. 1435–1436.
37. Solnitsev, R. I., Korshunov, G. I. About the tools for the design and production of cyber-physical systems. *Science and Business: Ways of Development*, 2020, no. 6, pp. 102–107.
38. Gorodetsky, V. I., Skobelev, P. O. Digital platform of cyberphysical systems. *Collection of proceedings of the XIII All-Russian meeting on management problems VSPU-2019. Institute of Management Problems named after V.A. Trapeznikov RAS*, 2019, pp. 2339–2344.
39. Clauberg R. Cyber-Physical Systems and Artificial Intelligence: Chances and Threats to Modern Economies. *World civilizations*, 2020, no. 3–4, pp. 107–115.
40. Vatamanyuk, I. V., Yakovlev, R. N. Generalized theoretical models of cyber-physical systems. *News of the South-West State University*, 2019, no. 23, pp. 161–175.
41. Sokolov, B. V., Zakharov, V. V., Nazarov, D. I. Joint operational planning of measuring and computing operations in cyber-physical systems. *Scientific Instrument Making*, 2020, no. 3, pp. 49–62.
42. Novoselsky, N. K., Glyadelov, D. S., Ragozin, A. A. Prospects for the development of cyber-physical systems in the Russian Federation. *Current Problems of Aviation and Astronautics*, 2021, no. 2, pp. 984–986.
43. Dobychina, A. V., Akimov, S. V. Study of data transfer protocols in cyber-physical systems. *Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University: XLVII scientific and educational-methodological ITMO University conference*, 2018, pp. 45–48.
44. Kulagina, I. V., Iskhakova, A. O., Galin, R. R. Modeling of aggression practices in a socio-cyberphysical environment. *Bulletin of Tomsk State University Philosophy. Sociology. Political science*, 2019, no. 52, pp. 147–161.
45. Bonci, A., Carbonari, A., Cucchiarelli, A., Messi, L., Pirani, M., Vaccarini, M. A Cyber-Physical System Approach for Building Efficiency Monitoring. *Autom. Constr.*, 2019, vol. 102.
46. Liu, G., Yang, H., Fu, Y., Mao, C., Xu, P., Hong, J., Li, R. Cyber-Physical System-Based Real-Time Monitoring and Visualization of Greenhouse Gas Emissions of Prefabricated Construction. *J. Clean. Prod.*, 2020, vol. 246.
47. Loubet, G., Takacs, A., Gardner, E., De Luca, A., Udrea, F., Dragomirescu, D. LoRaWAN Battery-Free Wireless Sensors Network Designed for Structural Health Monitoring in the Construction Domain. *Sensors*, 2019, no. 19.
48. Chelyshkov, P. D. Distributed modeling of construction systems through cyber-physical integration. *Industrial and civil construction*, 2019, no. 9, pp. 12–17.
49. Nasonov, E. I., Makisha, E. V. Cyberphysical systems in the construction industry. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019, no. 1.
50. Yohanandhan, R. V., Elavarasan, R. M., Manoharan, P., Mihet-Popa, L. Cyber-Physical Power System (CPPS): A Review on Modeling, Simulation, and Analysis with Cyber Security Applications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8.
51. Li, Q., Meng, S., Zhang, S., Wu, M., Zhang, J., Taleby Ahvanooy, M., Aslam, M. S. Safety Risk Monitoring of Cyber-Physical Power Systems Based on Ensemble Learning Algorithm. *IEEE Access*, 2019, vol. 7.
52. Elsis, M., Mahmoud, K., Lehtonen, M., Darwish, M. M. F. Reliable Industry 4.0 Based on Machine Learning and IOT for Analyzing, Monitoring, and Securing Smart Meters. *Sensors*, 2021, vol. 21.

53. Mokrova, N. V. Conceptual approach to the problems of smart cities. *Industrial and Civil Construction*, 2020, no. 7, pp. 32–40.
54. Nashivochnikov, N. V., Bolshakov, A. A., Nikolashin, Yu. A. Problematic issues of using analytical security tools for cyber-physical systems of fuel and energy complex enterprises. *Issues of Cybersecurity*, 2019, no. 5, pp. 26–33.
55. Arafsha, F., Laamarti, F., El Saddik, A. Cyber-Physical System Framework for Measurement and Analysis of Physical Activities. *Electronics*, 2019, vol. 8.
56. Chen, F., Tang, Y., Wang, C., Huang, J., Huang, C., Xie, D., Wang, T., Zhao, C. Medical Cyber-Physical Systems: A Solution to Smart Health and the State of the Art. *IEEE Trans. Comput. Soc. Syst.*, 2022, vol. 9.
57. Nikolsky, E. A., Petrunina, E. V. Cyber-physical modeling using brain-computer interface in problems of neurorehabilitation medicine. *Mathematical methods in engineering and technology : proceedings of international scientific conf. : in 12 vol.*, 2019, pp. 115–120.
58. Izotova, V. F. Problems of legal regulation of artificial intelligence of cyber-physical systems and robotics. *Problems and challenges of the digital society: trends in the development of legal regulation of digital transformations : a collection of scientific papers based on the materials of the I International scientific-practical conference*, 2019, pp. 125–127.
59. Gromakov, E. I., Zarnitsyn, A. Yu., Tsavnin, A. V., Leonov, S. V. Cyberphysical control of sorting fragments of a painting. *News of Tula State University. Technical science*, 2019, no. 12, pp. 575–582.
60. Gordienko, V. V., Glagolev, R. V. Problems of introducing artificial intelligence of digital technologies into the modern legal system. *Auditorium. Electronic scientific journal of Kursk State University*, 2020, no. 1.
61. Semenov, V. V., Salakhutdinova, K. I., Lebedev, I. S., Sukhoparov, M. E. Identification of anomalous deviations in the functioning of devices of cyber-physical systems. *Applied informatics*, 2019, no. 14, pp. 114–122.
62. Pustokhina, I. V., Zhigalov, A. M. Mass production based on autonomous (cyber-physical) production systems. *Quality management system: experience and prospects*, 2020, no. 9, pp. 304–307.
63. Monedero, Í., Barbancho, J., Márquez, R., Beltrán, J. F. Cyber-Physical System for Environmental Monitoring Based on Deep Learning. *Sensors*, 2021, vol. 21.
64. Kurbanov, A. Kh., Sobolev, A. V. Economic aspects of the creation and functioning of cyber-physical production and logistics systems. *Theory and practice of economics and entrepreneurship : XVI All-Russian with international participation of scientific- practical conference*, 2019, pp. 33–35.
65. Puliafito, A., Tricomi, G., Zafeiropoulos, A., Papavassiliou, S. Smart Cities of the Future as Cyber Physical Systems: Challenges and Enabling Technologies. *Sensors*, 2021, vol. 21.

Статья поступила в редакцию 17.12.2023; одобрена после рецензирования 06.02.2024; принята к публикации 06.02.2024.

The article was submitted 17.12.2023; approved after reviewing 06.02.2024; accepted for publication 06.02.2024.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

УДК 004.89

### **РАЗРАБОТКА МЕТОДА, КРИТЕРИЯ И АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТЬЮ**

*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

В работе проводится анализ существующих исследований по созданию интеллектуальных систем управления с ассоциативной памятью. Извлечение информации из ассоциативной памяти тесно связано с кластеризацией данных, что повышает способность системы обрабатывать и использовать большие объемы данных. Применяемые методы определения оптимального числа кластеров не учитывают последующую длительность, необходимую для поиска управления в кластеризованных данных из ассоциативной памяти. Целью исследования является разработка метода, критерия и алгоритма оптимизации функционирования интеллектуальной системы управления с ассоциативной памятью. Метод основан на поиске управления сначала среди центров кластеров, а затем внутри содержимого ближайшего к входным данным кластера. Критерий позволяет выбрать количество кластеров с точки зрения оценки максимальной длительности поиска управления в ассоциативной памяти для различных входных данных. Алгоритм сокращает количество итераций, необходимых для нахождения количества кластеров. Эффективность предложенного метода, критерия и алгоритма подтверждается результатами вычислительного эксперимента. Анализ полученных результатов показывает, что использование разработанных решений позволяет существенно сократить длительность поиска управления в ассоциативной памяти, повышая, в конечном итоге, эффективность функционирования интеллектуальной системы.

**Ключевые слова:** метод, критерий, алгоритм, оптимизация, эффективность, интеллектуальная система управления, ассоциативная память

### **DEVELOPMENT OF A METHOD, CRITERION AND ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE FUNCTIONING OF AN INTELLIGENT CONTROL SYSTEM WITH ASSOCIATIVE MEMORY**

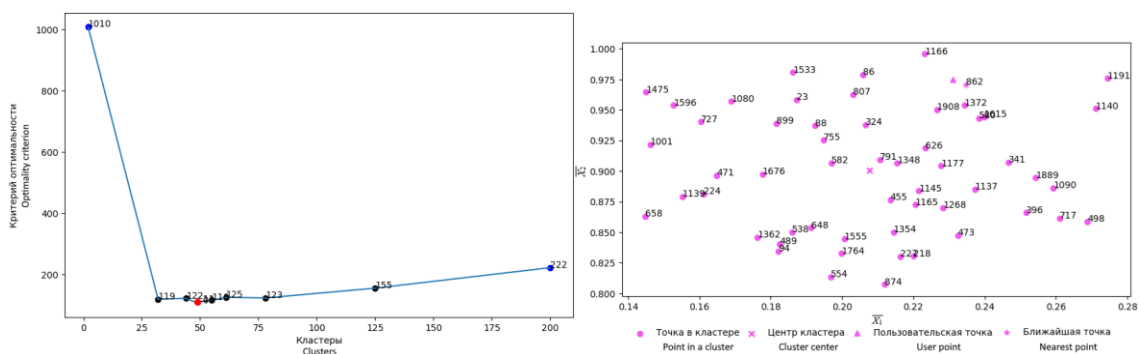
*Solovjev Denis S.*, Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-6613-3218, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

An analysis of existing research on the creation of intelligent control systems with associative memory is given in the article. Retrieving information from associative memory is closely related to data clustering, which increases the system's ability to process and use large amounts of data. The methods used to determine the optimal number of clusters do not take into account the subsequent duration required to search for control in clustered data from associative memory. The purpose of the study is to develop a method, criterion and algorithm for optimizing the functioning of an intelligent control system with associative memory. The method is based on searching for control first among cluster centers and then within the contents of the cluster closest to the input data. The criterion allows you to select the number of clusters from the view point of estimating the maximum control search duration in associative memory for various input data. The algorithm reduces the number of iterations required to find the number of clusters. Method, criterion and algorithm efficiency is confirmed by the results of a computational experiment. Analysis of the results obtained shows that the use of the developed solutions can significantly reduce the control search duration in associative memory, ultimately increasing the efficiency of an intelligent control system.

**Keywords:** method; criterion; algorithm; optimization; efficiency; intelligent control system; associative memory

Graphical annotation (Графическая аннотация)



**ВВЕДЕНИЕ**

Разработка интеллектуальных систем управления с ассоциативной памятью является перспективным направлением в технике и технологиях [1]. Данные системы способны учиться и адаптироваться к новым ситуациям, что делает их подходящими для широкого круга областей применения. Так, в работе [2] исследуется интеллектуальная система управления для робота-артикулятора, основанная на ассоциативной памяти и кинематической модели привода, с учетом инерционной нагрузки работы привода. Нейросетевая модель итерационной гетеро-ассоциативной памяти для интеллектуальной системы управления робототехническими аппаратами, способная автономно функционировать и адаптироваться к изменениям внешних условий, предложена в работе [3]. Способность таких систем принимать быстрые и точные решения делает их незаменимым инструментом в современных задачах управления. В интеллектуальных системах управления поиск информации в содержимом ассоциативной памяти тесно связан с кластеризацией данных [4]. Путем организации аналогичных данных в кластеры система может эффективно извлекать релевантную информацию из ассоциативной памяти и принимать обоснованные решения. Такая интеграция повышает способность системы обрабатывать и использовать большие объемы данных. Определение оптимального количества кластеров на базе метода «флоктя» рассматривается в работе [5] и основывается на поиске точки на графике, где увеличение числа кластеров не приводит к значительному уменьшению суммы квадратов расстояний каждой точки данных от центроида кластера, образуя изгиб. В работе [6] предложен метод определения оптимального числа кластеров для алгоритма *k-means*, основанный на анализе нескольких критериев (динамики перераспределения объектов в кластерах и изменения потенциальной энергии внутри кластеров) с использованием характерных точек их графиков. Следует отметить, что существующие методы определения оптимального количества кластеров не учитывают последующую длительность, необходимую для поиска управления в кластеризованных данных из ассоциативной памяти. В свою очередь оптимальное количество кластеров имеет решающее значение для эффективного поиска управления интеллектуальной системой, а взаимосвязь между количеством кластеров в ассоциативной памяти и длительностью поиска требует исследования. Для определения оптимального количества кластеров необходима разработка метода, критерия и алгоритма, направленных на минимизацию длительности поиска управления в ассоциативной памяти, что, в конечном итоге, повысит общую эффективность функционирования интеллектуальной системы.

Целью работы является разработка метода, критерия и алгоритма оптимизации функционирования интеллектуальной системы управления с ассоциативной памятью.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА, КРИТЕРИЯ И АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ**

Пусть в ассоциативной памяти имеется  $m$  точек вида:

$$\bar{\mathbf{X}}_j = \{ \bar{X}_{j,1}, \dots, \bar{X}_{j,i}, \dots, \bar{X}_{j,m} \}, (j = 1, \dots, m), \tag{1}$$

$$\mathbf{U}_j = \{ U_{j,1}, \dots, U_{j,i}, \dots, U_{j,n_2} \}, (j = 1, \dots, m), \tag{2}$$

$$\mathbf{Y}_j = \{ Y_{j,1}, \dots, Y_{j,i}, \dots, Y_{j,n_3} \}, (j = 1, \dots, m), \tag{3}$$

где  $\bar{X}_{j,i}$  – нормализованное значение  $i$ -й входной переменной для  $j$ -й точки;

$U_{j,i}$  – значение  $i$ -го управления для  $j$ -й точки;

$Y_{j,i}$  – значение  $i$ -й выходной переменной для  $j$ -й точки.

Применение метода *k-means* основано на идее разделения данных на определенное количество кластеров таким образом, что внутри каждого кластера находятся точки, которые более похожи друг на друга, чем на точки из других кластеров [7]. Формализация задачи кластеризации ассоциативной

памяти (1)–(3) по методу *k-means* подразумевает разбиение множества точек (1) на  $k^*$  кластеров таким образом, чтобы минимизировать сумму квадратов расстояний от каждой точки до центроида соответствующего кластера:

$$\Phi = \sum_{l=1}^{k^*} \sum_{j=1}^m \delta(j,l) \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i (\bar{X}_{j,i} - \beta_{l,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $\beta_{l,i}$  – нормализованное значение  $i$ -й входной переменной для центроида  $l$ -го кластера;

$\alpha_i$  – значимость  $i$ -й входной переменной;

$\delta(j,l)$  – бинарная функция, которая равна 1, если точка  $\bar{X}_j$  принадлежит  $l$ -му кластеру, иначе 0.

Решение задачи кластеризации по методу *k-means* сводится к поиску оптимальных значений центроидов  $\beta_{l,i}$  и меток кластеров  $\delta(j,l)$  по критерию (4) при заданном количестве кластеров  $k^*$ , которое заранее неизвестно.

Предлагаемый метод поиска неизвестного количества кластеров подразумевает использование следующего критерия:

$$\Omega(k, f_1, \dots, f_l, \dots, f_k) = k + \max\{f_1, \dots, f_l, \dots, f_k\}, \quad (5)$$

где  $f_l$  – количество точек в  $l$ -м кластере.

Критерий (5) представляет собой комбинацию двух параметров: суммы количества кластеров и максимального количества точек среди всех кластеров. Он позволяет учитывать и общее количество кластеров и размер самого большого кластера.

Тогда нахождение оптимального количества кластеров  $k^*$  для (4) подразумевает решение задачи минимизации:

$$k^* = \underset{k}{\operatorname{argmin}} \Omega(k, f_1, \dots, f_l, \dots, f_k). \quad (6)$$

После нахождения оптимального количества кластеров, а также распределения множества точек среди них поиск управления из ассоциативной памяти будет осуществляться в начале среди координат центроидов найденных кластеров, а затем по всем точкам, принадлежащим кластеру с ближайшим центроидом.

Решение задачи (6) предполагает для каждого значения  $k$  от 1 до  $k_{\max}$  (где  $k_{\max}$  – максимальное количество кластеров) вычисление критерия (5). Затем среди значений критерия (5) выбирается такое  $k^*$ , при котором этот критерий минимален. Данный подход может быть ресурсоемким, поскольку требует перебора различных значений  $k$  и вычисления критерия оптимальности (5) для каждого из них. Воспользуемся алгоритмом на основе метода золотого сечения [8], использующим принцип деления отрезка на две части и выбора одной из них для дальнейшего исследования. Рассмотрим основные шаги алгоритма решения задачи (6):

1. Задается начальный диапазон  $[a = 1, b = k_{\max}]$ .

2. Вычисляются точки  $c$  и  $d$  внутри  $[a, b]$  таким образом, чтобы:

$$\frac{|c-a|}{|b-c|} = \frac{|d-c|}{|b-d|}.$$

3. Вычисляются значения критерия  $\Omega(k = c, f_1, \dots, f_l, \dots, f_k)$  и  $\Omega(k = d, f_1, \dots, f_l, \dots, f_k)$  в точках  $c$  и  $d$  согласно:

3.1. Инициализируются центроиды  $\beta_{l,i}$  каждого кластера случайным образом.

3.2. Для каждой точки данных отыскивается ближайший центроид и присваивается точка  $k$  этому кластеру  $\delta(j,l) = 1$ .

3.3. Пересчитываются центроиды как среднее значение всех точек данных в каждом кластере.

3.4. Повторяются шаги 3.2, 3.3 до тех пор, пока центроиды не перестанут изменяться, то есть найден минимум  $\Phi$ .

4. Если  $\Omega(k = c, f_1, \dots, f_l, \dots, f_k) < \Omega(k = d, f_1, \dots, f_l, \dots, f_k)$ , то минимум критерия (5) находится на  $[a, d]$ , иначе –  $[c, b]$ .

5. Диапазон поиска уменьшается путем замены концов отрезка  $a$  или  $b$  на точки  $c$  или  $d$  соответственно.

6. Повторяются шаги 2–5 до тех пор, пока длина интервала не станет равной единице.

7. Решением задачи (6) выбирается минимальное из двух значений критерия (5) при  $k = a$  и  $k = b$ .

Таким образом, данный алгоритм, исключая неперспективные расчеты, позволит быстрее отыскать решение задачи (6).

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Рассмотрим пример реализации предлагаемого метода и алгоритма. Ассоциативная память интеллектуальной системы управления гальванического процесса содержит в себе  $m = 2000$  точек:

$$\begin{aligned} \bar{X}_j &= \{\bar{X}_{j,1}; \bar{X}_{j,2}\}, (j = 1, \dots, m), \\ U_j &= \{U_{j,1}\}, (j = 1, \dots, m), \\ Y_j &= \{Y_{j,1}\}, (j = 1, \dots, m), \end{aligned}$$

где  $\bar{X}_{j,1}$ ,  $\bar{X}_{j,2}$  – нормализованные значения температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) и кислотности электролита для  $j$ -й точки;

$U_{j,1}$  – значение силы электрического тока для  $j$ -й точки (А);

$Y_{j,1}$  – значение толщины покрытия для  $j$ -й точки (мкм).

Для нанесения цинкового гальванического покрытия задаются следующие границы неопределенности: температура – от 15 до 40  $^{\circ}\text{C}$ ; кислотность – от 3 до 5. Наполнение ассоциативной памяти значениями силы тока, обеспечивающей толщину получаемого покрытия не менее 20 мкм, осуществляется по математической модели гальванического процесса на базе законов Фарадея и Ома в дифференциальной форме, а также дифференциального уравнения Лапласа, описывающего распределение потенциала в электролите [9].

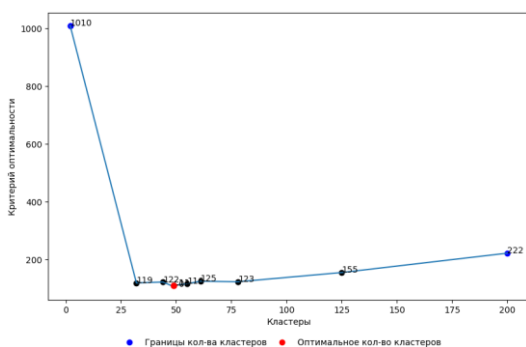
Решение задачи кластеризации для  $k_{\max} = 200$  выполняется с использованием разработанного программного обеспечения на языке *Python* [10].

По методу [11], основанному на определении влияния входных переменных на выходную переменную посредством нахождения максимальных значений, размаха и максимальных локальных изменений для вероятности неотрицательности отклонения выходной переменной от ее заданного значения, выполнен расчет значимости входных переменных.

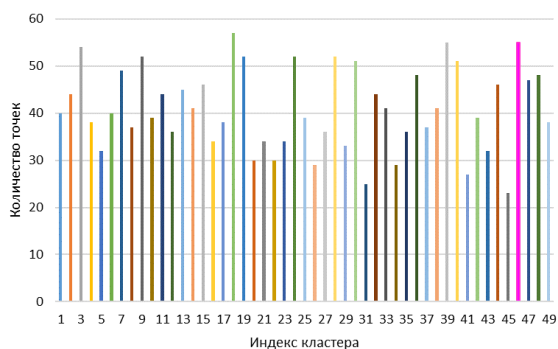
Поиск управления в кластеризованном содержимом ассоциативной памяти осуществляется для  $\bar{X} = \{0,231; 0,975\}$ , что соответствует температуре от 20,78  $^{\circ}\text{C}$  и кислотности 4,95.

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для выбранных входных переменных значимость составляет  $\alpha_1 = 0,7$  и  $\alpha_2 = 0,3$ . На рисунке 1а продемонстрирован процесс минимизации критерия оптимальности. Для нахождения минимума критерия потребовалось 9 итераций алгоритма, длительность которых составила 32,13 с. Длительность данного алгоритма составила 4,5 % от длительности минимизации критерия полным перебором. Критерий оптимальности имеет минимальное значение 111, из которых количество кластеров – 49. Распределение точек в найденном количестве кластеров приводится на рисунке 1б. Максимальное количество точек составляет 57 шт. и содержится в 18 кластере. Координаты найденных центроидов показаны на рисунке 1в.



а)



б)

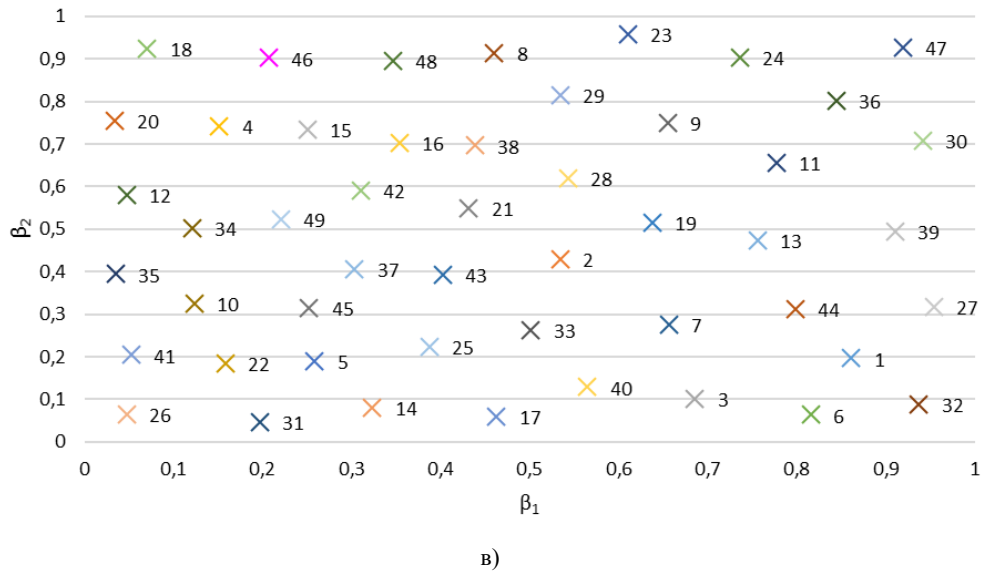


Рисунок 1 – Процесс минимизации критерия оптимальности (а) и распределение точек в оптимальном количестве кластеров (б), а также их центры (в)

Процесс поиска управления для  $\bar{X} = \{0,231; 0,975\}$  среди центроидов кластеров продемонстрирован на рисунке 2а, в результате которого найден 46-й кластер. На рисунке 2б приводится процесс поиска управления внутри найденного кластера, в результате которого найдена ближайшая точка 862 с минимальным расстоянием 0,004 до  $\bar{X}$ . Содержимое 46-го кластера с ближайшей точкой 862 к  $\bar{X}$  показано на рисунке 2в.

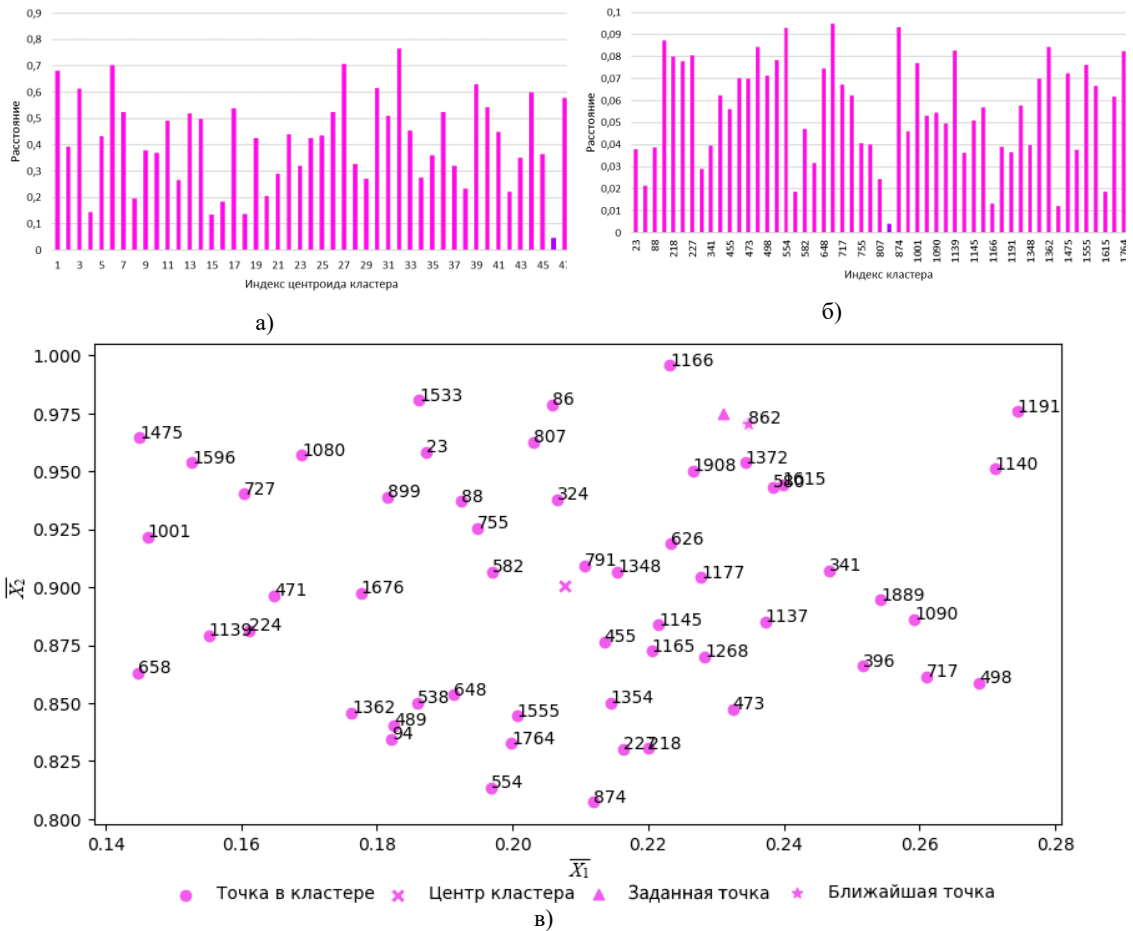


Рисунок 2 – Процесс поиска управления среди центроидов кластеров (а) и внутри кластера с минимальным расстоянием (б), а также его содержимое (в)

Найденная точка имеет значение  $\bar{X}_{862} = \{0,235; 0,971\}$  (что соответствует температуре от 20,88 °C и кислотности 4,94) с управлением  $U_{862} = \{161\}$  А и толщиной покрытия  $Y_{862} = \{21\}$  мкм. Для ее поиска понадобилось 109 операций сравнения, что, как и ожидается, не превышает величину критерия оптимальности. Длительность процесса составила  $7,5 \cdot 10^{-4}$  с, что составляет всего 6,25 % от длительности поиска полным перебором.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ускорение поиска управления в ассоциативной памяти способствует повышению эффективности функционирования интеллектуальных систем. Предложенные метод и критерий обеспечивают системный подход к оптимизации функционирования интеллектуальной системы управления, в то время как алгоритм осуществляет практическую реализацию данных принципов. Метод основывается на поиске управления сначала среди центров кластеров, а потом внутри содержимого ближайшего к входным данным кластера. Критерий оптимальности позволяет выбрать количество кластеров с точки зрения оценки максимальной длительности поиска управления в ассоциативной памяти при различных входных данных. Алгоритм оптимизации сокращает количество итераций, необходимых для нахождения количества кластеров, и уменьшает вычислительную сложность задачи минимизации критерия. Применение предложенных решений делает их перспективными для использования в различных областях деятельности, связанных с автоматизацией и управлением сложными техническими объектами при помощи интеллектуальных систем с ассоциативной памятью.

### Список источников

1. Романов, М. П. Интеллектуальные системы управления с ассоциативной памятью (Модели, алгоритмы и методы исследования) : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01 / Михаил Петрович Романов. – Москва, 1999. – 386 с.
2. Литвиненко, А. М. Интеллектуальная система управления с ассоциативной памятью для робота-артикулятора / А. М. Литвиненко, И. Ю. Галкин, А. А. Куртуков // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 2. – С. 35–39.
3. Prakupovich, R. Hetero-Associative Memory Technology for Development of Intelligent Control Systems of Autonomous Mobile Robots / R. Prakupovich // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2018. – № 8. – Р. 297–301.
4. Долгодворова, Е. В. Кластерный анализ: базовые концепции и алгоритмы / Е. В. Долгодворова // Вопросы науки и образования. – 2018. – № 7 (19). – С. 73–76.
5. Селуков, Д. А. Нахождение оптимального числа кластеров «Методом локтя» / Д. А. Селуков, В. С. Шиллов // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2016. – Т. 1. – С. 107–111.
6. Фролов, В. В. Метод расчета числа кластеров для алгоритма k-means / В. В. Фролов, С. Е. Слипенченко, О. Ю. Приходько // Экономика. Информатика. – 2020. – Т. 47, № 1. – С. 213–225.
7. Тюрин, А. Г. Кластерный анализ, методы и алгоритмы кластеризации / А. Г. Тюрин, И. О. Зуев // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2014. – № 2 (3). – С. 86–97.
8. Ширяев, В. И. Исследование операций и численные методы оптимизации : учеб. пос. / В. И. Ширяев. – Москва : ЛЕНАНД, 2015. – 216 с.
9. 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.
10. Соловьев, Д. С. Оптимизация количества кластеров для многомерных данных с целью ускорения поиска управляющих воздействий для заданных объектов / Д. С. Соловьев, И. А. Соловьева, В. А. Цибизов, Н. А. Фельдько // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021669506, дата регистрации 30.11.2021.
11. Соловьев, Д. С. Разработка и анализ интеллектуальной системы управления гальваническим процессом на базе ассоциативной памяти в условиях предсказуемой неопределенности / Д. С. Соловьев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 11. – С. 573–582.

### References

1. Romanov, M. P. *Intelligent control systems with associative memory (Models, algorithms and research methods) : Dr. tech. sci. diss.* Moscow, Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation, 1999. 386 p.
2. Litvinenko, A. M., Galkin, I. Yu., Kurtukov, A. A. Intelligent control system with associative memory for a robot articulator. *Electrical Complexes and Control Systems*, 2014, no. 2, pp. 35–39.
3. Prakupovich, R. Hetero-Associative Memory Technology for Development of Intelligent Control Systems of Autonomous Mobile Robots. *Open Semantic Technologies for the Design of Intelligent Systems*, 2018, no. 8, pp. 297–301.
4. Dolgodvorova, E. V. Cluster analysis: basic concepts and algorithms. *Questions of Science and Education*, 2018, no. 7 (19), pp. 73–76.
5. Selukov, D. A., Shilov, V. S. Finding the optimal number of clusters by method “elbow”. *Innovative Technologies: Theory, Tools, Practice*, 2016, no. 1, pp. 107–111.
6. Frolov, V. V., Slipchenko, S. E., Prihodko, O. Yu. Clusters number calculating method for the k-means algorithm. *Economy. Computer Science*, 2020, no. 47 (1), pp. 213–225.

7. Tyurin, A. G., Zuyev, I. O. Cluster analysis, methods and algorithms of the clustering. *Bulletin of MSTU MIREA*, 2014, no. 2 (3), pp. 86–97.

8. Shiryaev, V. I. *Operations research and numerical optimization methods : textbook*. Moscow, LENAND, 2015. 216 p.

9. Solovjev, D. S., Solovjeva, I. A., Litovka, Yu. V. Inverse problem solution of the mathematical modeling for galvanic process to optimize the non-uniformity of the coating thickness. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2020, no. 1 (49), pp. 131–143.

10. Solovjev, D. S., Solovjeva, I. A., Tsibizov, V. A., Fedko, N. A. Optimizing the number of clusters for multi-dimensional data in order to speed up the control actions search for given objects. *The Certificate on state registration of the computer program*, no. 2021669506, registration date 30.11.2021.

11. Solovjev, D. S. Development and Analysis of an Intelligent Electroplating Control System Based on Associative Memory under Conditions of Predictable Uncertainty. *Mechatronics, Avtomation, Control*, 2023, no. 24 (11), pp. 573–582.

Статья поступила в редакцию 23.11.2023; одобрена после рецензирования 19.12.2023; принята к публикации 26.12.2023.

The article was submitted 23.11.2023; approved after reviewing 19.12.2023; accepted for publication 26.12.2023.

DOI 10.54398/20741707\_2024\_1\_85  
УДК 004.001

## АНАЛИЗ ФИНАНСОВЫХ РЫНКОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

*Чернавин Николай Павлович*, Уральский федеральный университет, 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,  
ассистент, ORCID: 0000-0002-2093-9715, e-mail: ch\_k@mail.ru

Данное исследование охватывает развитие методов математического анализа фондовых рынков с использованием подходов машинного обучения и моделей математического программирования. В рамках исследования описана модель частично-целочисленного линейного программирования для решения задач бинарной классификации с наложением дополнительных условий на число используемых признаков модели и стабильности качества модели во времени. Данная модель реализует комитетный подход к решению задач классификации. Эффективность предложенной модели представлена на примере решения задачи прогнозирования моментов для покупки или продажи акций ПАО «Сбербанк» на основе биржевых данных за период с августа 2007 по май 2023 г. Полученные результаты торговой стратегии позволяют говорить о том, что предложенная модель имеет низкий риск получения убытков на периоде в 1 год, что подтверждается отсутствием периодов с метрикой Accuracy менее 50 %, а также оценкой потенциальных доходов, которая на всех годовых периодах была выше 10 %. Проведенное исследование подчеркивает значимость интеграции математического программирования и машинного обучения для повышения точности и эффективности торговых стратегий на фондовых рынках. Данная работа может представлять интерес для профессиональных трейдеров, исследователей данных, студентов экономических и технических специальностей, а также всех лиц заинтересованных в теме инвестиций и машинного обучения.

**Ключевые слова:** классификация, машинное обучение, математическое программирование, комитетные конструкции, анализ финансовых рынков

## ANALYSIS OF FINANCIAL MARKETS BASED ON MATHEMATICAL PROGRAMMING MODELS

*Chernavin P. Nikolai*, Ural Federal University, 19 Mira St., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation,  
assistant, ORCID: 0000-0002-2093-9715, e-mail: ch\_k@mail.ru

In this article are developed the methods for mathematical analysis of stock markets using machine learning approaches and mathematical programming models. The research describes a model of mixed-integer linear programming for solving binary classification tasks with additional conditions imposed on the number of features used in the model and the stability of the model's quality over time. This model implements a committee approach to solving classification tasks. The effectiveness of the proposed model is demonstrated by solving the task of predicting the moments for buying or selling shares of Sberbank PJSC based on stock market data from August 2007 to May 2023. The results of the trading strategy suggest that the proposed model has a low risk of losses over a one-year period, as evidenced by the absence of periods with an Accuracy metric below 50 %, as well as an assessment of potential revenues, which in all annual periods were above 10 %. This study highlights the importance of integrating mathematical programming and machine learning to enhance the accuracy and efficiency of trading strategies in the stock markets. This work may be of interest to professional traders, data researchers, students of economic and technical specialties, and anyone interested in the topics of investments and machine learning.

**Keywords:** classification, machine learning, mathematical programming, committee constructions, financial market analysis

### ВВЕДЕНИЕ

Данное исследование направлено на проверку практической применимости подхода, приведенного в статье [1] по использованию авторских моделей математического программирования для анализа финансовых рынков и развития подхода к анализу торговых стратегий, описанного в [2]. Технический анализ на финансовых рынках представляет собой совокупность методов, применяемых для прогнозирования динамики котировок финансовых инструментов, используя только данные о внутренних факторах рынка. Такими факторами могут быть, например, изменения текущей цены, рост/падение объемов торгов, формирование нового ценового минимума и т. д. Методы технического анализа можно по праву назвать наиболее популярными инструментами анализа биржевых рынков, так как большинство таких методов отличаются простотой и не требуют специальных знаний для их применения. Более того, с развитием вычислительных технологий и интернета базовый инструментальный технический анализ стал доступен практически всем слоям экономически активного населения.

Основы технического анализа были заложены еще в начале XX в. сооснователем Dow Jones & Company Чарльзом Доу. Им в период с 1900 по 1902 г. была опубликована серия статей о рынке ценных бумаг, которые легли в основу «Теории Доу». Согласно данной теории, при ведении торговли на финансовых рынках необходимо ориентироваться на следующие принципы, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Основные принципы «Теории Доу» [3]

Принцип	Описание
Рынок учитывает все	Любой фактор, способный повлиять на изменение цены, отразится в динамике индекса
Существует 3 типа трендов	– Долгосрочный; – среднесрочный; – краткосрочный
Тренд имеет 3 фазы	– Фаза накопления (наиболее дальновидные и информированные инвесторы начинают покупать); – фаза участия (к торгам присоединяются последователи технических методов следования за трендом); – фаза реализации (широкая публика подключается к торгам. Тренд подходит к своему концу)
Тренд продолжается, пока не появится очевидный сигнал его разворота	Тренд имеет тенденцию к продолжению, и его завершение должно носить однозначный характер
Биржевые индексы должны подкреплять друг друга	Сигнал от одного технического индикатора должен быть подтвержден показаниями других технических индикаторов
Тренд подтверждается объемами торгов	Объем торгов должен повышаться, когда цены двигаются в направлении основной тенденции

Указанные принципы легли в основу методов технического анализа, став своего рода «аксиомами» биржевой торговли. Даже несмотря на то, что данные идеи были выдвинуты более чем 100 лет назад, они остаются столь же актуальны, как и раньше.

В рамках современного технического анализа существуют многочисленные методы. При этом в литературе можно встретить различные виды классификации методов технического анализа [4]. Ниже на рисунке приведена авторская классификация методов в зависимости от технологической сложности применяемых методов обработки данных для извлечения полезной прогностической информации.



Рисунок – Классификация методов технического анализа по сложности обработки данных

Схема на рисунке отражает 3 основных вида методов технического анализа, которые расположены в порядке возрастания сложности обработки исходных данных. Графический анализ состоит в выделении различных ценовых моделей, называемых фигурами, на выстраиваемых на основании рыночных данных графиках. Фигура на графике проявляется таким образом, что его законченное формирование предопределяет будущее направление цен финансового актива. Такой анализ, с одной стороны, не требует дополнительной обработки данных, но, с другой, является наиболее субъективным, так как выделение графических фигур не имеет однозначно формализованной методики.

В рамках анализа индикаторов строятся относительные показатели, используя исходные биржевые данные. Индикаторы позволяют рассмотреть текущую рыночную ситуацию с новых сторон, что делает прогнозы более объективными. Например, индикатор может учитывать один биржевой параметр, но с учетом его изменения во времени, как, например, средняя за определенный период для выбранного параметра. Также индикатор может свести вместе совокупность биржевых параметров, таких как цена и объем. К новым относительным значениям также может быть применен графический анализ (используется, например, при построении скользящих средних).

Данное исследование рассматривает вопросы развития методов математического анализа биржевых рынков с применением подходов машинного обучения с использованием моделей математического программирования.

### ОПИСАНИЕ ДАННЫХ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для проведения исследования были выбраны биржевые данные по обыкновенным акциям ПАО «Сбербанк» за период с августа 2007 по май 2023 г. Данные были собраны как в дневных, так и в часовых разрезах. В качестве признаков модели использовались различные технические индикаторы, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Технические индикаторы для анализа

Индикатор	Диапазон значений
Значение гистограммы MACD	Целые числа
Сигнал от медленного стохастического осциллятора (SSO)	от 0 до 1
Сигнал от индекса относительного силы (RSI)	от 0 до 1
Отношение экспоненциальной скользящей средней (EMA) к цене закрытия	от 0 до 1
Отношение текущей цены закрытия к предыдущей	от 0 до 1
Отношение текущей цены открытия к предыдущей	от 0 до 1
Отношение текущего минимума цены к предыдущей	от 0 до 1
Отношение текущего максимума цены к предыдущей	от 0 до 1

При этом стоит отметить, что данные индикаторы могут иметь различные параметры, связанные с глубиной анализа истории, поэтому для индикаторов 2–3 были применены различные периоды. Также над ними было проведено математическое преобразование по следующей формуле:

$$\text{Sign}(p - 0,5) * ((p - 0,5) * 2)^n, \quad (1)$$

где  $p$  – это значение признака;

$n$  – степень, в которую возводится выражение  $(p - 0,5) * 2$ .

Всего было выделено 1192 уникальных признака<sup>1</sup>. Однако наличие самих данных еще недостаточное условие для того, чтобы поставить задачу машинного обучения. Для этого сперва необходимо определить базовый подход торговой стратегии, для которой будет строиться модель. Базовый подход можно описать в виде следующих пунктов:

1. Торговля в рамках торговой стратегии происходит в течение 1 дня. Соответственно, по окончании дня все позиции должны быть закрыты. Такой подход является вполне логичным, так как он позволяет максимально снизить риски изменения рыночной ситуации в периоды, когда торги закрыты. Зафиксируем, что закрытие будет происходить в 18 часов.

2. Сделки совершаются с 11 по 15 часов в начале каждого часа. Так как торговый день начинается в 10 часов, то в рамках стратегии имеется возможность оценить поведение рынка по первому часу. Отказ совершать сделку после 15 часов обусловлен тем, что сделка закрывается в 18 часов, поэтому необходимо оставить время, чтобы торговый сигнал имел возможность сформироваться.

3. Рассматриваем возможность сделки, если средняя волатильность за последние 3 дня превышает 2,5 %. Такое ограничение должно сконцентрировать сделки в периодах с большей волатильностью цены.

<sup>1</sup>  $n$  применялось 1, 2, 3, 0,5.

4. Если в первый час торгов цена менялась более чем на 2,5 % от цены закрытия предыдущего дня, то в такой день сделки не производятся. Данное ограничение связано с тем, что значительное изменение цены может быть свидетельством того, что за момент с закрытия предыдущего дня произошли события, которые в значительной мере повлияли на цены и еще не успели найти своего отражения в рамках технического анализа.

Исходя из вышеизложенного правила вытекает, что цель трейдинговой модели состоит в том, чтобы определять моменты, когда стоит покупать акцию и когда продавать. Такая постановка на языке машинного обучения может быть представлена как задача бинарной классификации, где классами выступают:

- 0 – наблюдения перед падением стоимости акций;
- 1 – наблюдения перед ростом стоимости акций.

Рост и падение будут определяться относительно часовых закрытий в течение 1 торгового дня. При этом дополнительно определимся, что если одновременно наблюдался как рост, так и падение, то такие наблюдения исключаются из выборки для модельного анализа, так как такие наблюдения не имеют однозначного класса.

Определив постановку задачи и используемые данные, можно приступить к описанию моделей машинного обучения. Для построения моделей будем использовать язык программирования Python, на котором реализовано большинство популярных моделей машинного обучения. Далее по тексту при описании использованных пакетов будут иметься ввиду пакеты Python.

Для бинарной классификации будем использовать следующую модель математического программирования с частично-целочисленными переменными:

$$\sum_{i \in I} p_{ij} * x_i^t + b^t - L * z_j^t \leq -\varepsilon, \quad j \in J_1, t \in T \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} p_{ij} * x_i^t + b^t + L * z_j^t \geq \varepsilon, \quad j \in J_2, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{t \in T} (z_j^t * V^t) \leq m + L * d_j, \quad j \in J_1 \quad (3)$$

$$\sum_{t \in T} (z_j^t * V^t) \leq \sum_{t \in T} V^t - m - 1 + L * d_j, \quad j \in J_2 \quad (4)$$

$$-L * r_i \leq x_i^t \leq L * r_i, \quad i \in I, t \in T \quad (5)$$

$$\frac{\sum_{j \in J} d_j * Q_j^q}{\sum_{j \in J} Q_j^q} \leq S, \quad q = 1, 2, \dots \quad (6)$$

$$\min(S + k * \frac{\sum_i r_i}{N}), \quad (7)$$

где  $d_j$  – булевы переменные для фиксации нарушений классификации;

$V^t$  – веса членов комитета;

$m$  – положительная целочисленная переменная для фиксации границы определения большинства в рамках комитета;

$J_1$  и  $J_2$  – множества, которые необходимо разделить;

$J = J_1 \cup J_2$  – множество наблюдений;

$I$  – множество параметров наблюдений;

$T$  – множество членов комитета (гиперплоскостей);

$i, j, t$  – индексы соответствующих множеств;

$p_{ij}$  –  $i$ -й параметр  $j$ -го наблюдения (подаваемые в модель значения);

$x_i^t$  – коэффициент гиперплоскости  $t$  для  $i$ -го (вычисляемые коэффициенты);

$b^t$  – свободные члены гиперплоскостей (вычисляемые коэффициенты);

$L$  – очень большое число (для однозначного выполнения условий неравенств);

$\varepsilon$  – очень малое число (используем для строгости ограничений);

$z_j^t$  – булевы переменные для фиксации нарушений условий разделения;  
 $r_i$  – булева переменная, определяющая информативен  $i$ -й признак или нет;  
 $Q_j^q$  – булева переменная, определяющая относится ли  $j$ -е наблюдение к  $q$ -му периоду;  
 $S$  – максимальная доля ошибок классификации среди всех  $q$ -х периодов;  
 $k$  – коэффициент, учитывающий степень влияния доли используемых признаков в модели в качестве штрафного коэффициента к целевой функции;  
 $N$  – число исследуемых признаков.

Данная модель относится к моделям комитетных конструкций. Логика работы метода комитетов напоминает работу «обычного комитета» как коллегиального руководящего органа, где решение принимается на основании решений группы экспертов. В случае метода комитетов роль экспертов исполняют несколько разделяющих линейных дискриминантов (гиперплоскостей), называемых также членами комитета, каждый из которых голосует за решение по-своему [5].

С подробным описанием предложенной модели можно познакомиться в [1–2]. Отдельно отметим, что описание модели на языке математического программирования позволяет реализовывать в модели дополнительные условия, такие как определение, согласно условию (5), переменных  $r_i$  для обозначения информативных признаков  $i \in I$ , а также переменной  $S$  в рамках условия (6), для отражения максимальной доли ошибок классификации для выбранного  $q$ -го числа периодов. Обе введенные переменные влияют на построение модели через целевую функцию (8).

Для реализации комитетной конструкции будем использовать пакет *MIP* [6]. Применение именно комитетной конструкции, описанной как модель математического программирования с частично-целочисленными переменными, дает следующие преимущества:

1. Обладает большей интерпретируемостью решающего правила.
2. Позволяет добавлять в модель дополнительные условия, такие как поиск информативных признаков и равномерное распределение ошибок по выборке.

Основным недостатком применения такого подхода является трудоемкость расчетов при решении задач частично-целочисленного линейного программирования. Для снижения влияния данного недостатка модель комитетной конструкции будет использоваться в рамках стекингвого подхода к обучению. В машинном обучении стекинг относится к ансамблевым решениям, в рамках которых создается метамодель, которая использует в качестве признаков ответы от других классификаторов разной природы [7], как правило, отличной от природы стекингвого алгоритма.

Соответственно, определим список базовых классификаторов для создания стекингвого решения. К этому списку отнесем классические модели машинного обучения, реализованные в пакете *sklearn*, обладающие низкой степенью переобучения. Далее по тексту будем называть их базовыми моделями. К ним отнесем такие модели как:

1. Логистическая регрессия [8].
2. Наивный Байес [9].
3. Дерево решений с глубиной 3 [10].

Перед началом обучения моделей необходимо подготовить обучающую, валидационную и тестовую выборки. С этой целью разделим всю выборку согласно таблице 3.

Таблица 3 – Выборки для обучения простых моделей

Период	Выборка	Число наблюдений
2013–2021	Обучение (80 %)	3740
	Тест (20 %)	
2009–2012	Валидация	2155

Отметим, что период с 2007 по 2008 г. не используется для построения и оценки модели, так как в данный период происходили существенные изменения, связанные как с раздроблением акций Сбербанка в 2007 г., так и начавшимся экономическим кризисом 2008 г. Так как данные модели требуют минимальных вычислительных ресурсов, то построим модели с использованием отбора информативных признаков методом последовательного добавления признаков в модель и оценки качества на основе метрики Ассигасу. Такая метрика является наиболее интуитивно понятной для задач со сбалансированными классами, такими как предсказание направления движения рынка. Отбор информативных признаков выстроим следующим образом:

1. На каждой итерации добавления признака считаем наиболее информативным признаком тот, который дает наибольший прирост Ассигасу на обучении и Ассигасу на валидации не меньше, чем полученный результат на предыдущей итерации добавления признака (на первой итерации считаем, что предыдущий результат равен 0).

2. Алгоритм останавливается, если добавление нового признака дает прирост Ассигасу менее чем 0,003 или число признаков модели превысило 10.

Из всего множества построенных моделей было выделено 55 моделей, где:

1. Разница между обучением и тестом по Ассигасу не превышает 0,03.

2. На тесте и валидации Ассигасу выше 0,565 для моделей Логистической регрессии и 0,58 для остальных моделей.

Воспользуемся полученными вероятностями принадлежности к классу 1 от базовых моделей в качестве признаков для модели (2–7), выполняющей роль метамодели для стекинга. При этом разделим выборку на обучающую и тестовую, как показано ниже в таблице 4.

Таблица 4 –Выборки для обучения модели комитетной конструкции

Период	Выборка	Число наблюдений
2019–2021	Обучение	403
2022–2023	Тест	353

С использованием модели (2–7) были построены комитетные конструкции из 3, 4 и 5 членов. Ниже в таблице 5 представлены результаты моделей по метрике Ассигасу в разрезе годов. Для каждой модели также в скобках указано число признаков, используемых в моделях комитетных конструкций, вычисленных применяя штрафной коэффициент за долю используемых признаков, равный 0,5 ( $k = 0,5$ ).

Таблица 5 – Оценка Ассигасу разных моделей

Год	Комитетные конструкции			Catboost
	3 чл. (6)	4 чл. (6)	5 чл. (7)	
2007	50 %	58 %	56 %	56 %
2008	54 %	53 %	52 %	62 %
2009	66 %	69 %	63 %	68 %
2010	55 %	55 %	59 %	72 %
2011	57 %	56 %	55 %	66 %
2012	61 %	61 %	59 %	70 %
2013	55 %	53 %	51 %	59 %
2014	63 %	61 %	54 %	70 %
2015	57 %	60 %	60 %	65 %
2016	57 %	50 %	55 %	71 %
2017	58 %	55 %	48 %	62 %
2018	62 %	53 %	55 %	69 %
2019	67 %	56 %	54 %	71 %
2020	55 %	63 %	60 %	71 %
2021	60 %	57 %	57 %	64 %
2022	47 %	54 %	55 %	46 %
2023	65 %	63 %	54 %	57 %
MIN	47 %	50 %	48 %	46 %
MAX	67 %	69 %	63 %	72 %
MEAN	58 %	57 %	56 %	65 %

Для сравнения к таблице 5 была также добавлена бустинговая модель, рассчитанная на основе пакета *Catboost* [11]. Данная модель строилась на тех же признаках, на которых рассчитывалась модель комитетных конструкций. Выбор именно бустинговой модели связан с тем фактом, что такие модели относятся к одним из наиболее популярных решений в создании прогнозных моделей в связи с такими их свойствами, как [7]:

1. Высокая вычислительная скорость даже на больших выборках.
2. Простота применения. Легко начать работать и не требует дополнительной нормировки признаков модели.
3. Универсальность в решении различных задач как классификации, так и регрессии.
4. Высокая обобщающая способность, существенно превосходящая на практике классические модели машинного обучения.

Однако при этом такие модели обладают недостатком, связанным с повышенным риском переобучения. Для снижения данного риска модель была ограничена глубиной дерева не более 2, числом деревьев до 100. Данные гиперпараметры показали наилучший результат при использовании метода *GridSearchCV* [12], входящего в пакет *sklearn*, дополнительно также была выделена валидационная выборка с 2019 по 2021 г., которая была учтена при обучении модели.

Исходя из полученных результатов, можно видеть, что модель комитетной конструкции из 4 членов показала наилучший результат на тестовой выборке. При этом, если рассматривать в разрезе годов минимальное значение Ассигасу, у нее было 50 %, что выше аналогичных значений остальных моделей. Такой показатель позволяет предполагать, что на годовом периоде применения модели будет пониженный риск получения значительных убытков. Стоит отметить, что модель, построенная с использованием алгоритма *Catboost*, имеет самые низкие результаты на тестовой выборке, вместе с тем показывая самые высокие средние результаты по Ассигасу, что говорит о том, что, даже несмотря на снижение сложности модели и включение валидационной выборки, модель оказалась переобученной.

Оценка по Ассигасу позволяет нам оценить качество модели, однако финальный результат требует оценки в виде бизнес-метрики. Для трейдинга такой метрикой может выступать оценка потенциальной доходности от использования стратегии. Ниже в таблице 6 представлены приблизительные расчеты данной метрики без учета транзакционных издержек при условии, что под любой сигнал покупается/продается одинаковое количество лотов акций Сбербанка.

Таблица 6 – Оценка доходности моделей комитетных конструкций

Год	Комитетные конструкции			
	3 чл. (6)	4 чл. (6)	5 чл. (7)	Единогласное решение
2007	17,5 %	6,7 %	-5,7 %	5,9 %
2008	125,6 %	80,5 %	46,6 %	86,1 %
2009	307,2 %	416,8 %	266,4 %	285,4 %
2010	1,3 %	-12,8 %	38,3 %	22,1 %
2011	124,4 %	133,5 %	104,9 %	114,6 %
2012	51,1 %	66,9 %	28,6 %	39,9 %
2013	19,4 %	24,2 %	2,2 %	10,8 %
2014	131,4 %	93,9 %	-11,1 %	60,1 %
2015	163,4 %	206,4 %	201,6 %	183,9 %
2016	31,9 %	30,9 %	61,4 %	46,1 %
2017	73,4 %	38,3 %	-0,3 %	42,5 %
2018	123,7 %	-3,7 %	45,6 %	74,3 %
2019	32,8 %	11,2 %	16,1 %	19,1 %
2020	88,3 %	128,9 %	128,0 %	110,6 %
2021	62,9 %	61,6 %	56,7 %	60,4 %
2022	8,7 %	111,3 %	174,5 %	93,1 %
2023	26,8 %	22,2 %	5,9 %	16,3 %

Исходя из результатов из таблицы 6, можно видеть, что комитет из 4 членов действительно показывает высокие результаты на тестовом периоде по доходности. При этом наиболее высокую доходность все модели имеют в периоды высокой волатильности цен. Для комитета из 4 членов исторически в период 2010 и 2018 годов доходность была отрицательной, однако величина убытков не превышала 13 %. Также обратим внимание на то, что комитет из 3 членов ни в одном из периодов не ушел в убыток, однако в тестовом периоде 2022 г. показал низкую доходность – менее 9 % при доходности 111 % и 174 % для моделей 4 и 5 членов соответственно.

С учетом наличия преимуществ каждой модели в разные периоды рассмотрим смешанную модель, использующую результаты всех 3-х моделей. Для этого установим, что торговым сигналом

будет считаться наличие единогласного решения от всех 3-х моделей. В таблице 6 также представлены данные расчеты, которые показали, что итоговое решение ни в одном из периодов не ушло в убытки, показав на годовом периоде доходность не менее 10,8 %<sup>1</sup>. Более того, во всех периодах повышенной волатильности (2008, 2009, 2014, 2015, 2018, 2020, 2022) модель показывает доходность более 60 %, тогда как по отдельности каждая из моделей упускала 1–2 таких периода. Также преимуществом совместного решения является тот факт, что число совершаемых сделок уменьшается приблизительно на 25 %, что ведет к тому, что также уменьшаются транзакционные расходы, которые могут в значительной мере влиять на доходность торговой стратегии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье приведены результаты создания прогностической модели поведения финансовых рынков на основе моделей математического программирования. В рамках проведенного исследования была сформирована авторская торговая стратегия в виде задачи машинного обучения. Полученные результаты позволили подтвердить гипотезу, что применение моделей математического программирования с частично-целочисленными переменными позволяет снизить риск переобучения за счет отражения в модели дополнительных условий, основанных на существующем опыте и экспертизе в исследуемой предметной отрасли. Такими условиями в рассматриваемой модели классификации выступили ограничения для минимизации числа признаков с использованием минимакс стратегии на долю ошибок классификации. Выбор таких условий позволил увеличить обобщающую способность модели, что привело к высоким результатам модели на тестовой выборке.

Также проведенные расчеты и оценка качества моделей показали, что представленная модель комитетной конструкции может быть эффективно использована в качестве метамодели, объединяющей результаты более простых моделей. Данный факт позволяет обойти ограничение, связанное с высокой вычислительной сложностью расчета моделей с частично-целочисленными переменными за счет снижения размерности обучающей выборки. Ответы моделей, подаваемых в качестве признаков, учитывают всю предыдущую историю, что позволяет обучаться даже на относительно небольшой выборке (использовалось только 403 наблюдения в обучающей выборке). Итоговый результат показал, что комитетная конструкция в виде метамодели с классификацией справляется лучше, чем современные бустинговые модели, которые имеют свойство в значительной мере переобучаться на данных. Данный вывод подтверждается сравнением Ассигасу метрик моделей, а также полученной оценкой доходности.

Конечные результаты позволяют говорить о том, что создание прогностической модели поведения финансовых рынков на основе моделей математического программирования является перспективным направлением для исследования. Возможность учитывать в модели дополнительные условия открывает широкий простор для настройки модели под конкретную торговую стратегию, что может позволить как улучшать существующие торговые стратегии, так и создавать абсолютно новые на основе проводимых расчетов. Более того, модельные условия не ограничиваются только представленными в данной статье и могут быть в значительной мере дополнены исходя из требования конкретной торговой стратегии.

### Список источников

1. Чернавин, П. Ф. Управление качеством решающего правила и минимизация числа признаков в задачах классификации на основе моделей математического программирования / П. Ф. Чернавин, Н. П. Чернавин, Ф. П. Чернавин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – № 1. – С. 112–119.
2. Чернавин, Н. П. Применение метода комитетов к анализу технических индикаторов фондового рынка / Н. П. Чернавин // Бизнес-информатика. – 2019. – Т. 13, № 4. – С. 73–86.
3. Колби, Р. Энциклопедия технических индикаторов рынка / Р. Колби, Т. Мейерс. – Москва : Издательский дом «Альпина», 2000. – 581 с.
4. Мальшенко, К. А. Теоретические основы анализа фондового рынка: система показателей и классификация методов / К. А. Мальшенко, В. А. Мальшенко, Е. О. Квятковская // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 129. – С. 1292–1303.
5. Ablow C. M. A Committee Solution of the Pattern Recognition Problem / C. M. Ablow, D. J. Kaylor // IEEE Transactions on Information Theory IT-11. – 1965. – Vol. 3. – P. 453–455.
6. PYTHON-MIP. – URL: <https://python-mip.readthedocs.io/en/latest/intro.html> (дата обращения: 23.11.2023).
7. Кашницкий, Ю. С. Ансамблевый метод машинного обучения, основанный на рекомендации классификаторов / Ю. С. Кашницкий, Д. И. Игнатов // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. – 2015. – Т. 19, № 4. – С. 37–55.
8. sklearn.linear\_model.LogisticRegression. – URL: [https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear\\_model.LogisticRegression.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LogisticRegression.html) (дата обращения: 23.11.2023).
9. Naive Bayes. – URL: [https://scikit-learn.org/stable/modules/naive\\_bayes.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/naive_bayes.html) (дата обращения: 23.11.2023).

<sup>1</sup> 2007 год не учитывается, так как в него входит неполный календарный год.

10. `sklearn.tree.DecisionTreeClassifier`. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.tree.DecisionTreeClassifier.html> (дата обращения: 23.11.2023).
11. `CatBoost`. – URL: <https://catboost.ai/> (дата обращения: 23.11.2023).
12. `sklearn.model_selection.GridSearchCV`. – URL: [https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model\\_selection.GridSearchCV.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.GridSearchCV.html) (дата обращения: 23.11.2023).

#### References

1. Chernavin, P. F., Chernavin, N. P., Chernavin, F. P. Control of the quality of the decision rule and minimization of the number of features in classification problems based on mathematical programming models. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2023, no. 1, pp. 112–119.
2. Chernavin, N. P. Application of the Committee Method to the Analysis of Technical Indicators of the Stock Market. *Business Informatics*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 73–86.
3. Kolby, R., Meyers, T. *Encyclopedia of Technical Market Indicators*. Moscow, Alpina Publisher House, 2000. 581 p.
4. Malyshenko, K. A., Malyshenko, V. A., Kvyatkovskaya, E. O. Theoretical Foundations of Stock Market Analysis: System of Indicators and Classification of Methods. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 2017, no. 129, pp. 1292–1303.
5. Ablow, C. M., Kaylor, D. J. A Committee Solution of the Pattern Recognition Problem. *IEEE Transactions on Information Theory IT-11*, 1965, vol. 3, pp. 453–455.
6. `PYTHON-MIP`. Available at: <https://python-mip.readthedocs.io/en/latest/intro.html> (accessed 23.11.2023).
7. Kashnitsky, Y. S., Ignatov, D. I. Ensemble Machine Learning Method Based on Classifier Recommendation. *Intelligent Systems. Theory and Applications*, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 37–55.
8. `sklearn.linear_model.LogisticRegression`. Available at: [https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear\\_model.LogisticRegression.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LogisticRegression.html) (accessed 23.11.2023).
9. `Naive Bayes`. Available at: [https://scikit-learn.org/stable/modules/naive\\_bayes.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/naive_bayes.html) (accessed 23.11.2023).
10. `sklearn.tree.DecisionTreeClassifier`. Available at: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.tree.DecisionTreeClassifier.html> (accessed 23.11.2023).
11. `CatBoost`. Available at: <https://catboost.ai/> (accessed 23.11.2023).
12. `sklearn.model_selection.GridSearchCV`. Available at: [https://scikitlearn.org/stable/modules/generated/sklearn.model\\_selection.GridSearchCV.html](https://scikitlearn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.GridSearchCV.html) (accessed 23.11.2023).

Статья поступила в редакцию 24.12.2023; одобрена после рецензирования 13.12.2023; принята к публикации 22.12.2023.

The article was submitted 24.12.2023; approved after reviewing 13.12.2023; accepted for publication 22.12.2023.

# **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

УДК 004.82

## **РУССКО-АНГЛИЙСКИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ КОРПУС ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЕРЕВОДА ТЕКСТА ПАТЕНТОВ**

**Коробкин Дмитрий Михайлович**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: dkorobkin80@mail.ru

**Рязанова Мария Андреевна**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, 28,

бакалавр, e-mail: marusya.ryazanova@gmail.com

**Фоменков Сергей Алексеевич**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская федерация, г. Волгоград, пр. имени В.И. Ленина, 28,

доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9907-4488, e-mail: saf550@yandex.ru

**Бобунов Артем Владимирович**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, 28,

аспирант, e-mail: btema1999@yandex.ru

В настоящее время использование связки – (а) программные средства глубокого обучения и (б) параллельный двуязычный выравненный корпус текстов – позволяет создать переводчик для определенной предметной области. С помощью семейства патентов Patent Family (изобретения, профессионально переведенные на различные языки: русский, английский и т. п. и зарегистрированные в патентных базах различных стран), полученного посредством парсинга Google Patents, возможно создать параллельный корпус текстов для обучения лингвистической модели. В ходе работы получен новый метод, обеспечивающий формирование русско-английского параллельного корпуса для автоматического перевода текста патентов. Разработаны алгоритмы: парсинга патентов с Google Patents; формирования параллельного корпуса; обучения лингвистической модели перевода текстов патентов с использованием модели seq2seq. Разработанные алгоритмы реализованы в виде программного модуля на языке Python с использованием PyTorch, NLTK, spaCy, MySQL, ClickHouse. Программный модуль апробирован на патентах с сайта Google Patents. Для вычисления точности перевода были рассчитаны коэффициент BLEU и коэффициент полноты.

**Ключевые слова:** автоматические переводчики, технические тексты, глубокое машинное обучение, патенты, парсинг

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00464, <https://rscf.ru/project/23-21-00464>.

## **THE RUSSIAN-ENGLISH PARALLEL CORPUS FOR AUTOMATIC TRANSLATION OF THE PATENT TEXTS**

**Korobkin Dmitry M.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: dkorobkin80@mail.ru

**Ryazanova Maria A.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

master's student, e-mail: marusya.ryazanova@gmail.com

**Fomenkov Sergey A.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-9907-4488, e-mail: saf550@yandex.ru

**Bobunov Artem V.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

postgraduate student, e-mail: btema1999@yandex.ru

Currently, the use of a combination of (a) deep learning software tools and (b) a parallel bilingual aligned corpus of texts allows you to create a translator for a specific subject area. With the help of the Patent Family (inventions professionally translated into various languages: Russian, English, etc., and registered in patent databases of various

countries) obtained through Google Patents parsing, it is possible to create a parallel corpus of texts for teaching a linguistic model. In this study an algorithm for the formation of a Russian-English parallel corpus for automatic translation of the text of patents was developed. In particular, algorithms have been developed: parsing patents with Google Patents; formation of a parallel corpus; teaching the model to translate patent texts using the seq2seq model. The developed algorithms are implemented as a software module in Python using Python, NLTK, spaCy, MySQL, ClickHouse. The software module has been tested on patents from the Google Patents website. To calculate the accuracy of the translation, the BLEU coefficient and the completeness coefficient were calculated.

**Keywords:** automatic translators, technical texts, deep machine learning, patents, parsing

**Financial support:** the work was supported by the Russian Science Foundation, Project № 23-21-00464, <https://rscf.ru/project/23-21-00464>.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность перевода российских патентов можно разделить на две основные сферы:

1. Первая связана с патентным поиском, который необходим для авторов патентов и экспертов патентного ведомства для определения, не зарегистрированы ли ранее подобные данному изобретения;
2. Вторая – желание зарегистрировать патент в зарубежных патентных ведомствах. В таких случаях требуется перевести патентную документацию с русского языка на иностранный, как правило, на английский, так как он имеет международное значение [1].

Существующий процесс перевода патентной документации осуществляется либо вручную автором патента при наличии продвинутого уровня владения иностранным языком, либо профессиональным переводчиком из специализированных агентств [2] при отсутствии у автора патента должного уровня владения иностранным языком или соответствующего желания (рис. 1).

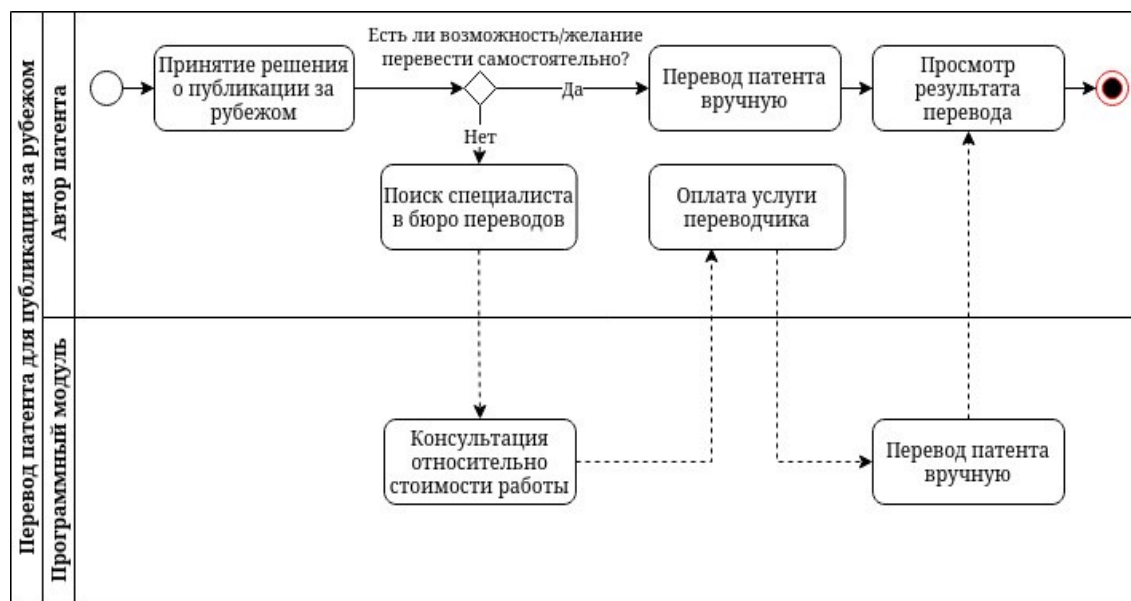


Рисунок 1 – Существующий процесс перевода патентной документации

Проанализировав существующий процесс перевода, можно сделать вывод, что в процессе перевода патентной документации автор патента в любом случае теряет большое количество времени и денег из-за того, что перевод патента производится вручную.

В настоящий момент онлайн-переводчики получили существенное развитие, однако невозможно не заметить, что при переводе технических текстов наблюдаются погрешности в их работе. Это связано с тем, что патентная документация имеет свою специфическую структуру и лингвистические особенности. В ней широко используются специализированные термины, которые в контексте патентов имеют значения, отличные от обычных. Кроме того, в патентных документах часто применяются архаизмы и канцеляризмы [3]. Неправильный перевод такой документации может привести к отказу в регистрации патента.

Во время исследования предметной области было проанализированы статьи [1–4] на тему сложности перевода патентной документации. На основе этих примеров правильного перевода сложных предложений с английского языка на русский можно протестировать работу «обычных» автоматических переводчиков (табл. 1).

Таблица 1 – Таблица сравнения правильного «ручного» перевода патентов с переводом от «Яндекс Переводчик»

Предложение на английском	Как следует переводить	Вариант перевода «Яндекс Переводчик»
Whereafter the strain in the first cluster decreases	После чего натяжение в первой связке уменьшается	После этого напряжение в первом кластере уменьшается
The gist of the disclosure can be exposed more completely by attached description and drawings	Сущность изобретения может быть более полно раскрыта прилагаемым описанием и чертежами	Суть раскрытия может быть раскрыта более полно с помощью прилагаемого описания и чертежей
The main effects will be understood from the following disclosure and accompanying drawings	Основные преимущества станут понятными из следующего описания и прилагаемых чертежей	Основные эффекты будут понятны из следующего описания и сопроводительных рисунков

Проанализировав сравнения (табл. 1), можно сделать выводы, что «обычный» автоматический переводчик искажает смысл предложения, а поэтому совершенно не подходит для перевода патентной документации.

Однако не стоит отказываться от использования автоматических переводчиков, поскольку их основным преимуществом является скорость. Это позволит изобретателям быстрее получать патенты и начинать использовать выгоду от своих изобретений.

Анализ предметной области позволил выявить три переводчика: WIPO Translate [5], Google Patent Translate [6] и PatSnap [7], позволяющих корректно проводить перевод патентной документации (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты сравнения существующих решений

Критерий/решение	WIPO Translate	Google Patent Translate	PatSnap
Языковая поддержка, кол-во языков	20	32	100
Платное ПО	Бесплатно	Бесплатно	Платно
Возможность бесплатного тестирования ПО	+	+	–
Использование машинного обучения	+	+	+
Учитывает спецификацию в области знаний	–	–	–
Серверы локализованы на территории РФ	–	–	–
Осуществляет работу без использования сети Интернет	–	–	–

Все проанализированные решения достаточно хорошо справляются с переводом патентной документации, однако не работают без интернет-подключения, а их серверы не локализованы на территории РФ, таким образом при принятии важных решений, основанных на переводе патента, стоит с опаской относиться к их работе.

В настоящее время использование связки – (а) программные средства глубокого обучения и (б) параллельный двуязычный выравненный корпус текстов – позволяет создать переводчик для определенной предметной области. С помощью семейства патентов Patent Family (изобретения, профессионально переведенные на различные языки: русский, английский и т. п. и зарегистрированные в патентных базах различных стран), полученного посредством парсинга Google Patents, возможно создать параллельный корпус текстов для обучения лингвистической модели.

**Целью работы** является повышение эффективности автоматического перевода патентов за счет формирования русско-английского параллельного корпуса для обучения лингвистической модели. Разрабатываемый алгоритм нацелен на автоматизацию процесса перевода патентной документации, что, в свою очередь, позволит сэкономить ресурсы (время и деньги) заинтересованного в этом лица. Ниже представлен автоматизированный процесс перевода патентной документации (рис. 2).

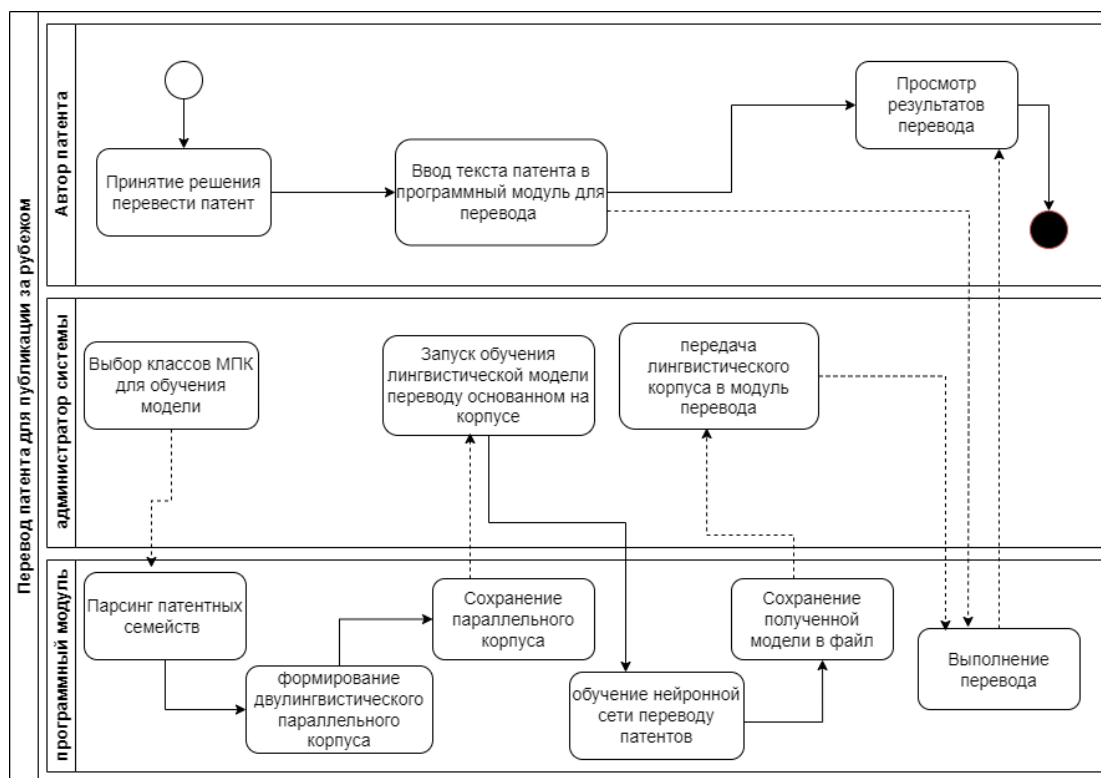


Рисунок 2 – Автоматизированный процесс перевода патентной документации

Сравнив существующий и автоматизированный процессы, можно заметить, что автоматизация процесса перевода полностью исключает участие переводчика, тем самым экономит денежные и временные ресурсы автора патента, так как время ожидания перевода от программы значительно меньше времени ожидания перевода от бюро переводов.

#### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ПРОЦЕССУ

Разработан перечень функциональных требований к программному модулю:

1. Извлечение патентных текстов: модуль должен извлекать патентные тексты из поисковой системы Google Patents.
2. Хранение данных патентов: а) полученные данные о патентах должны быть сохранены в системе управления базами данных (СУБД) ClickHouse [8, 9]; б) модуль должен поддерживать распределенную файловую систему Hadoop Distributed File System (HDFS) для эффективного хранения и управления данными [10].
3. Формирование выровненного параллельного двуязычного корпуса, в котором тексты на русском и английском языках согласованы и выровнены для последующего использования в автоматическом переводе.
4. Создание лингвистической модели. Модуль должен обеспечивать создание лингвистической модели на основе сформированного параллельного корпуса с помощью технологии seq2seq [11] и фреймворка PyTorch [12].
5. Перевод патентной документации с русского языка на английский.

Ниже приведена диаграмма вариантов использования разрабатываемого программного модуля (рис. 3).

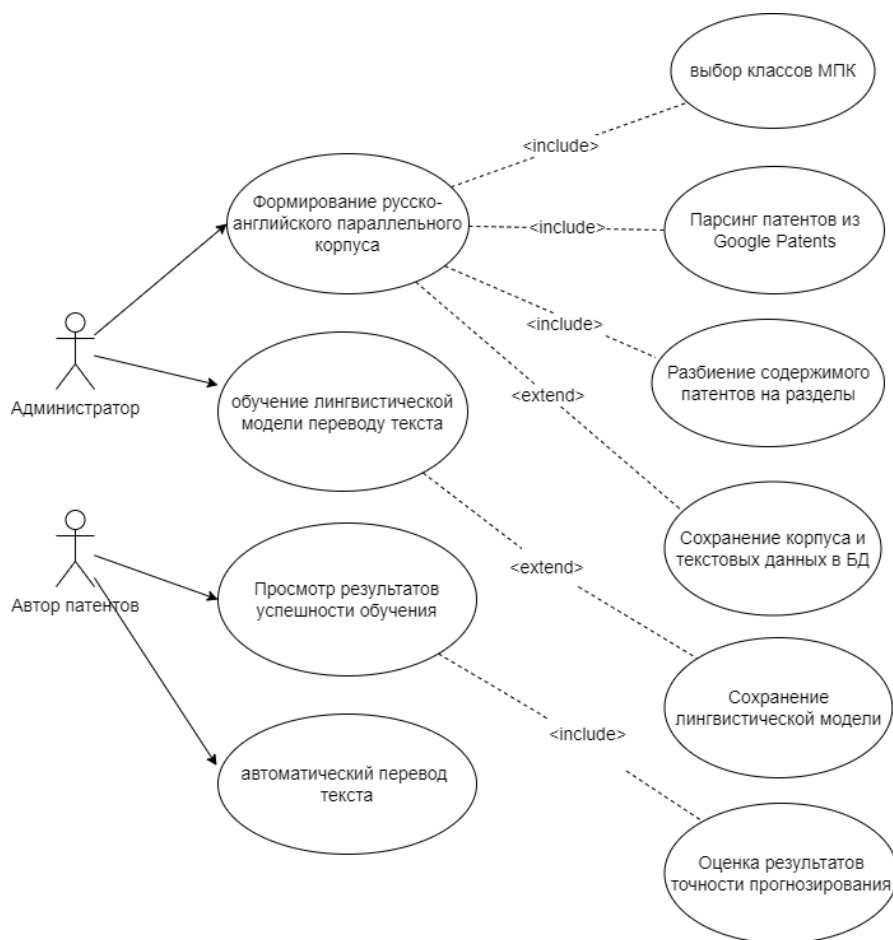


Рисунок 3 – Диаграмма вариантов использования

1. Формирование русско-английского параллельного корпуса – первоначальный этап, на котором определены четыре основные задачи:

а) выбор классов МПК. Пользователь выбирает категории патентов, которые будут использоваться для обучения модели. Это позволяет увеличить точность перевода, так как корпус будет содержать специфические термины в выбранной области знаний;

б) парсинг патентов. Модуль ищет русскоязычные патенты в выбранных категориях МПК и проверяет наличие англоязычных версий патентов. Если оба варианта доступны, они загружаются и сохраняются в базе данных для дальнейшего использования;

в) разбиение содержания патентов на разделы. С помощью заранее подготовленного словаря заголовков текст патентов разделяется на разделы, что позволяет сохранить выровненность между русским и английским текстом. Каждому русскому предложению сопоставляется английский вариант.

г) сохранение параллельного корпуса в базу данных.

2. Обучение лингвистической модели на основе полученного русско-английского параллельного корпуса. Эту модель можно сохранить в файл для дальнейшего использования;

3. Просмотр результатов эффективности обучения с использованием метрики BLEU [13, 14], которая позволяет определить, насколько точно полученная модель переводит текст.

#### АЛГОРИТМ ПАРСИНГА ПАТЕНТОВ С САЙТА GOOGLE PATENTS

1. По названию категории формируется запрос на сайт Google Patents для получения списка патентов выбранной категории.

2. Из списка патентов выделяются патенты на русском языке, которые имеют аналогичный патент на английском языке (английский патент отсутствует в Patent Family на русском языке), формируются ссылки на выделенные патенты.

3. Формируется запрос в Google Patent для получения текста русско- и англоязычных патентов.

Схема алгоритма представлена ниже (рис. 4).

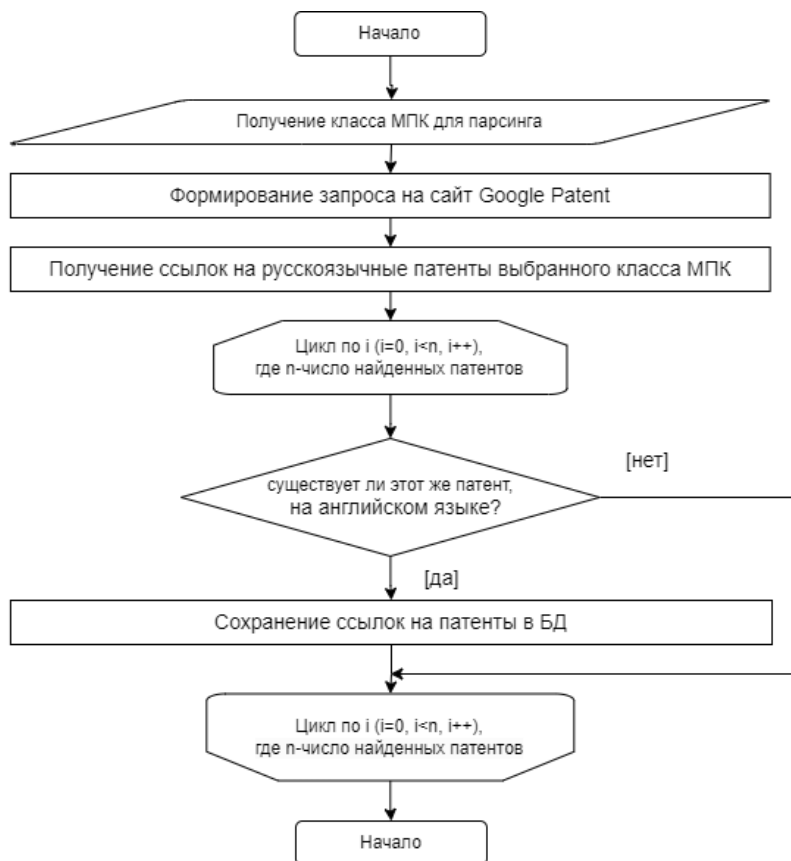


Рисунок 4 – Алгоритм парсинга патентов

#### АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОРПУСА

1. Полученный текст патентов разбивается на предложения.
2. По словарю заголовков выделяются разделы.
3. Сопоставляются заголовки разделов двух патентов на разных языках, сопоставленные предложения раздела сохраняются в БД.

Схема алгоритма представлена ниже (рис. 5).

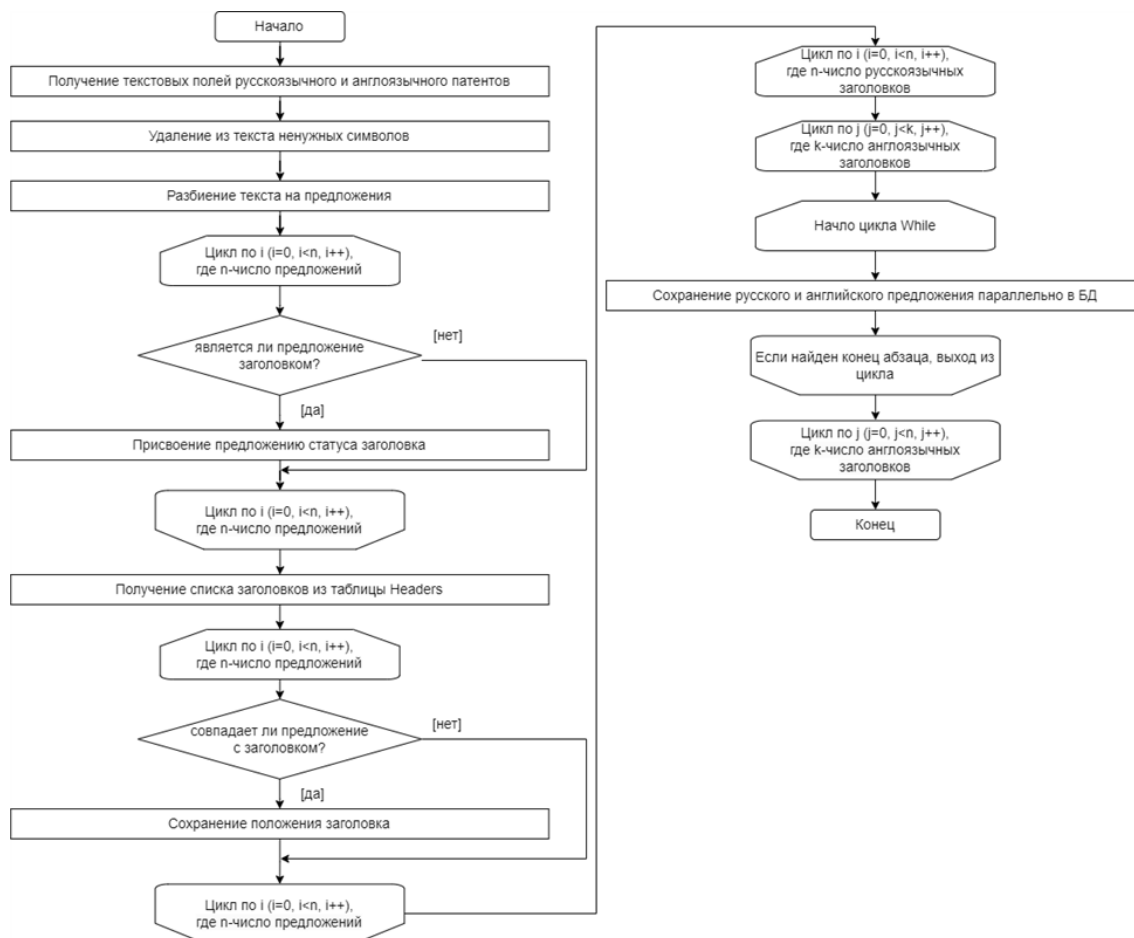


Рис. 5 – Алгоритм формирования параллельного корпуса

### АЛГОРИТМ ОБУЧЕНИЯ МОДЕЛИ ПЕРЕВОДУ ТЕКСТОВ ПАТЕНТОВ

1. Подготовка данных (загрузка файлов данных. нормализация текста, фильтрация текста по длине и содержанию).

2. Построение модели seq2seq, состоящей из двух RNN, называемых кодером и декодером:

а) первая RNN (кодер) обучается получать входной текст и последовательно кодировать его.

Для каждого слова из входного предложения слова кодер выводит вектор [15] и скрытое состояние, а также использует скрытое состояние для следующего входного слова;

б) декодер (вторая RNN) принимает выходной вектор кодера (закодированную последовательность) и выполняет преобразование текста (выводит последовательность слов для создания перевода).

3. Обучение модели:

а) создание набора обучающих данных;

б) заполнение массива потерь.

4. Оценка посредством создания прогнозов перевода.

5. Инициализация нейросети и начало обучения.

6. Сохранение полученной лингвистической модели в файл.

Схема алгоритма представлена ниже (рис. 6).

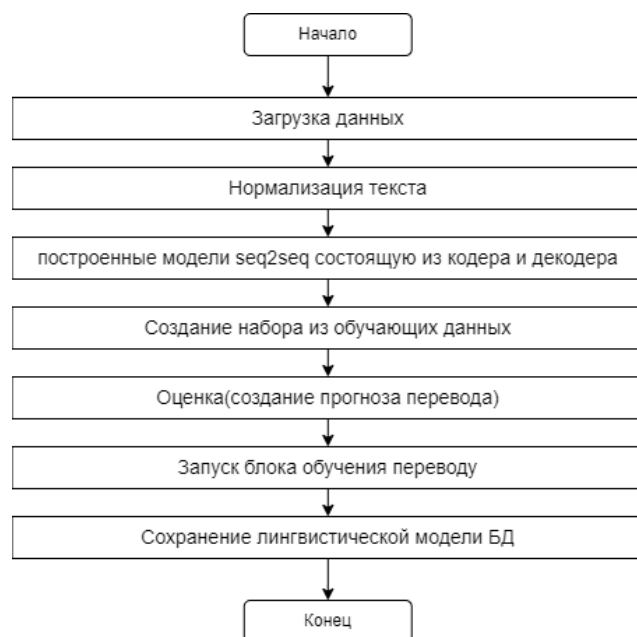


Рисунок 6 – Алгоритм обучения лингвистической модели

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ

Программный модуль реализован с использованием концепции «Чистая архитектура» – способ организации кода, который четко разделяет функциональные компоненты приложения и передает только необходимые ресурсы. Этот метод позволяет снизить сложность каждого компонента, снизить вероятность ошибок и ускорить исправление. Однако для эффективного использования чистой архитектуры необходимо сознательно следовать ее принципам и внедрять их на каждом этапе разработки приложения.

Схема архитектуры программного модуля формирования русско-английского параллельного корпуса для автоматического перевода текста патентов представлена ниже (рис. 7).

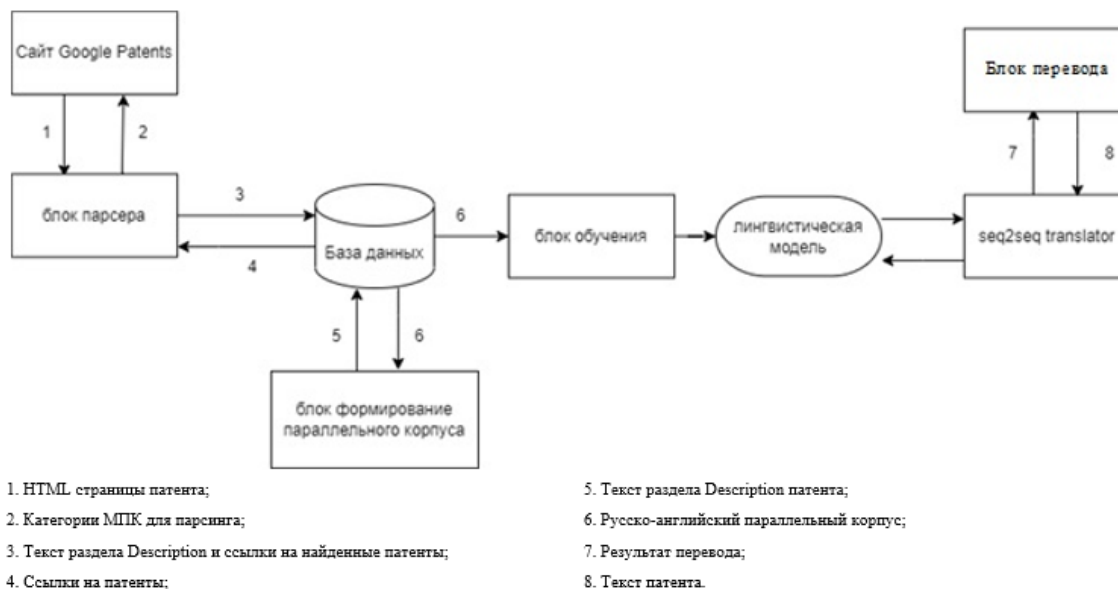


Рисунок 7 – Архитектура программного модуля

Основными компонентами программного модуля являются парсер, блок обучения и блок перевода текста:

1. Парсер получает данные русскоязычных и англоязычных патентов с сайта Google Patent, сохраняет полученные данные в БД.

2. Блок формирования параллельного корпуса извлекает из БД текст патентов, разбивает его на предложения и формирует параллельный корпус.

3. Блок обучения на вход получает параллельный корпус, затем с помощью фреймворка PyTorch и метода seq2seq обучает лингвистическую модель переводу патента.

4. Блок перевода на вход получает лингвистическую модель, на предсказаниях которой строит перевод.

Основным языком разработки является Python. Для загрузки страниц используются драйверы из библиотеки Selenium [16]. Для парсинга HTML-документов используется библиотека BeautifulSoup [17]. Библиотека NLTK [18] используется для предварительной обработки полученных текстов и их сегментации. Фреймворк обработки естественного языка PyTorch используется в качестве инструмента для построения модели обучения и перевода. При обучении модели для сегментации и токенизации используется библиотека spaCy [19]. Схема БД [20] представлена ниже (рис. 8).

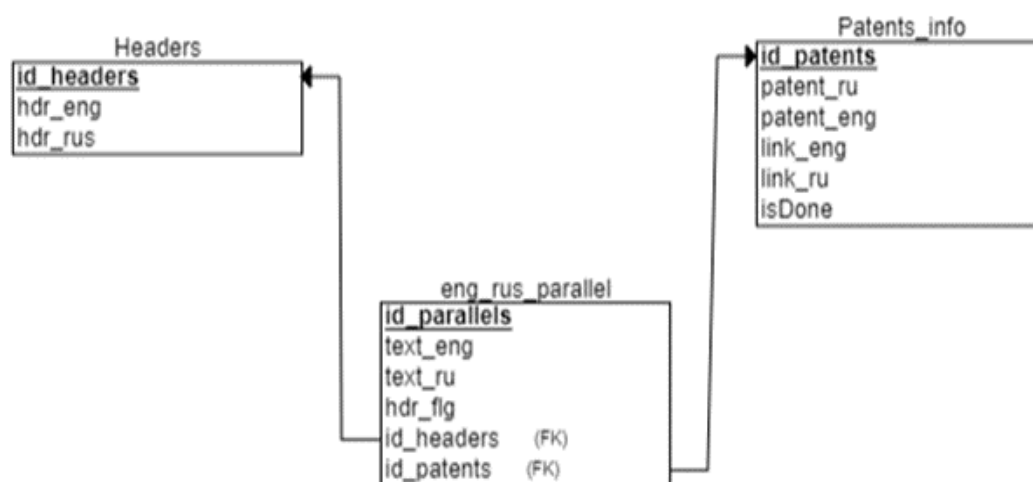


Рисунок 8 – Схема БД

Для реализации модуля создан класс Transformer как наследник класса nn.Module библиотеки PyTorch. В классах Encoder, Decoder реализованы кодировщик и декодер соответственно. Главным компонентом подхода к обработке естественного языка с применением нейронных сетей является использование векторных представлений (англ. embeddings) – представление каждого признака в виде вектора в линейном векторном пространстве. Для этого создан класс Embedder. Класс tokenizer предназначен для разбиения предложения на слова.

Для обеспечения взаимозаменяемости алгоритмов модуля из разных операционных систем и баз данных используется паттерн «Стратегия». Его необходимость объясняется необходимостью запускать модуль в разных операционных системах без изменения кода программы (в настоящее время реализовано для Windows-MySQL и Ubuntu-ClickHouse).

#### ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для вычисления точности перевода были рассчитаны следующие коэффициенты: а) BLEU; б) коэффициент полноты.

BLEU (двуязычная оценка дублера) – это алгоритм для оценки качества текста, который был переведен с одного естественного языка на другой с помощью машинного перевода. Качество считается соответствием между машинным и человеческим переводом: «Чем ближе машинный перевод к профессиональному человеческому переводу, тем он лучше». Коэффициент рассчитывается на основе баллов, которые определяются для отдельных переведенных сегментов (предложений) путем сравнения их с набором эталонных переводов хорошего качества. Эти оценки затем усредняются по всему корпусу, чтобы получить оценку общего качества перевода. Значение BLEU представляет собой число от 0 до 1. Это значение указывает, насколько текст-кандидат похож на справочные тексты, а значения, близкие к 1, указывают на приближенность результата к оригинальному переводу от профессионального переводчика. В данной работе для расчета показателя использовался модуль BLEU, на вход которого передавались пары предложений: оригинального перевода и переведенный модулем текст. Полученные модулем результаты представлены ниже (рис. 9).

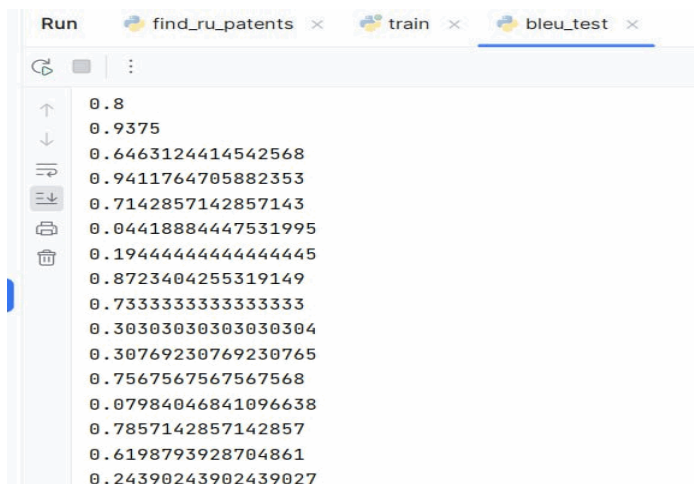


Рисунок 9 – Результат вывода модуля оценки точности перевода метрикой BLEU

Для оценки точности перевода было взято 1000 переведенных предложений, было подсчитано среднее значение метрики BLEU для всех предложений, оно равно 0,46, однако в эту выборку входили также непереведенные предложения (коэффициент BLEU меньше 0,2). И если исключить эти предложения из оценки, то точность перевода составит 0,61. Фрагмент таблицы с подсчитанными итогами представлен ниже (рис. 10).

1	Column2	BLEU	общее	Невыданные	Нерелевантные	Релевантные	BLEU>0.5	BLUE >0.2	>0.2
977	the present invention provi	0,80562	1	0	0	1	0,80562	0,80562	1
978	the terminal may be referre	0,5625	1	0	0	1	0,5625	0,5625	1
979	for example, the gesture de	0,07359	1	1	0	0	0	0	0
980	component information car	0,76092	1	0	0	1	0,76092	0,76092	1
981	in some embodiments, the	0,1875	1	1	0	0	0	0	0
982	rfid is controlled by the exc	0,54545	1	0	0	1	0,54545	0,54545	1
983	such embodiments are pres	0,8	1	0	0	1	0,8	0,8	1
984	one reason of this increase	0,44444	1	0	1	0	0	0,44444	1
985	this function can be provide	0,26471	1	0	1	0	0	0,26471	1
986	here, the identifier inform	0,79167	1	0	0	1	0,79167	0,79167	1
987	one or more significant fan	0,1463	1	1	0	0	0	0	0
988	if the first touch signal obta	0,725	1	0	0	1	0,725	0,725	1
989	the power management cir	0,95	1	0	0	1	0,95	0,95	1
990	computer may operate in a	0,18335	1	1	0	0	0	0	0
991	therefore, there is a need t	0,75798	1	0	0	1	0,75798	0,75798	1
992	such a delay at the beginnir	0,18065	1	1	0	0	0	0	0
993	for example, the sensor ma	0,16667	1	1	0	0	0	0	0
994	embodiments of the preser	0,91667	1	0	0	1	0,91667	0,91667	1
995	in an alternative embodime	0,20662	1	0	1	0	0	0,20662	1
996	the advent of mouse pointi	0,7037	1	0	0	1	0,7037	0,7037	1
997	for example, the device ma	0,03132	1	1	0	0	0	0	0
998	in the claimed solution, the	0,72414	1	0	0	1	0,72414	0,72414	1
999	in operation, the binary coc	0,80642	1	0	0	1	0,80642	0,80642	1
1000	as another example, compl	0,21876	1	0	1	0	0	0,21876	1
1001	applications can use sip wit	0,84615	1	0	0	1	0,84615	0,84615	1
1002	in order to overcome the di	0,81818	1	0	0	1	0,81818	0,81818	1
1003	when the file is an executal	0,84211	1	0	0	1	0,84211	0,84211	1
1004	in accordance with an exer	0,75676	1	0	0	1	0,75676	0,75676	1
1005	embodiments of the invent	0,61905	1	0	0	1	0,61905	0,61905	1
1006	in response to the server sy	0,77041	1	0	0	1	0,77041	0,77041	1
1007		0,46599045	1005	296	219	476	0,758436387	0,614225997	702

Рисунок 10 – Фрагмент таблицы расчетов оценки BLEU

Коэффициент полноты – доля правильно переведенных системой предложений по сравнению с их общим количеством в выборке для перевода. Для расчета коэффициента были взяты части описания нескольких патентов на русском языке, переведенные в разработанном модуле. Был осуществлен поиск патентов в Google Patents. Затем переведенные патенты сравнивались с патентами, который выдал поиск по оригинальному английскому описанию. Релевантным результатом нами было установлено считать предложения, точность перевода которых по метрике BLEU – выше 0,5, соответственно, для нерелевантных предложений точность перевода ниже 0,5. Предложения с точностью 0–0,2 относятся к непереведенным.

Расчеты коэффициента полноты на 1000 предложениях приведены ниже (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты работы модуля перевода

Предложения	Релевантные	Нерелевантные	Всего
Переведенные	476	219	695
Непереведенные	296	–	296
Всего	702	219	1005

Коэффициент полноты равен числу релевантных переводов, деленному на сумму релевантных выданных и невыданных переводов, и равен  $467/702 = 0,67$ .

Коэффициент точности равен отношению релевантных результатов к сумме всех результатов, то есть  $479/695 = 0,68$ .

Ниже представлено сравнение оригинального перевода и результатов работы разработанного программного модуля (табл. 4).

Таблица 4 – Сравнение оригинального перевода и результатов работы разработанной системы

Фрагмент из патента RU2692049C1	Способ и устройство для перевода на основе модели нейронной сети в вариантах осуществления настоящего изобретения позволяют выполнять перевод в сочетании с различными инструментами перевода и повышать качество перевода, а также гладкость и удобочитаемость результата перевода.
Фрагмент из патента US10789431B2	The method and apparatus for translation based on the neural network model in the embodiments of the present invention can perform translation in combination with various translation features and improve the translation quality, fluency and readability of the translation result.
Результат перевода программным модулем	The method and apparatus for translation based on the neural network model in embodiments of the present invention allows you to perform translation in combination with various translation tools and increase the translation quality, fluency and readability of the translation result

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы разработан новый метод, обеспечивающий формирование русско-английского параллельного корпуса для автоматического перевода текста патентов. Сформированы следующие алгоритмы:

- 1) парсинга текстов патентов с сайта Google Patents;
- 2) формирования русско-английского параллельного корпуса;
- 3) обучения лингвистической модели seq2seq на основе сформированного параллельного корпуса.

Алгоритмы были реализованы в виде программного модуля на языке Python и апробированы на тестовых данных. Модуль предоставляет возможность применения в различных областях, связанных с автоматизированным переводом, но в основном направлен на машинный перевод текстов патентов. При этом важно учитывать ограничения автоматического перевода и обеспечивать проверку переводов профессиональными переводчиками для обеспечения высокого качества перевода.

## Список источников

1. Особенности перевода патентной документации // НаучныеПереводы.рф. – URL: [https://научныепереводы.рф/perevod\\_patentov/](https://научныепереводы.рф/perevod_patentov/) (дата обращения: 05.06.2023).
2. Перевод патентов – услуги профессиональных переводчиков технических текстов // Бюро переводов «Фларус». – URL: <http://www.patent-translation.ru/> (дата обращения: 05.06.2023).
3. Особенности перевода патентной документации // Компания Effectiff – Бюро переводов в Москве. – URL: <https://www.effectiff.com/node/358> (дата обращения: 05.06.2023).
4. Триноженко, М. Д. Специфика перевода патентной литературы / М. Д. Триноженко, Ю. Л. Гончарова // Молодой исследователь Дона. – 2016. – № 1 (1).
5. WIPO Translate (ВОИС Переводчик) // WIPO. – URL: <https://www.wipo.int/wipo-translate/ru/> (дата обращения: 05.06.2023).
6. EPO – Patent Translate // EPO. – URL: <https://www.epo.org/searching-for-patents/helpful-resources/patent-translate.html> (дата обращения: 05.06.2023).
7. Patsnap | Best Patent Search Tool // PatSnap. – URL: <https://www.patsnap.com/> (дата обращения: 05.06.2023).
8. Что такое ClickHouse // ClickHouse. – URL: <https://clickhouse.com/docs/ru> (дата обращения: 27.04.2023).
9. Коробкин, Д. М. Анализ патентного массива с использованием связи Clickhouse и HDFS1 / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, С. А. Козина, А. Б. Голованчиков // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 3. – С. 94–99.

10. Дзидзава, Э. Т. Большие данные и Hadoop: обзорный доклад / Э. Т. Дзидзава, К. М. Ахмедов // Вестник магистратуры. – 2021. – Т. 1, № 1 (112). – С. 30–325.
11. Sequence to Sequence (seq2seq) and Attention // Lena Voita. – URL: [https://lena-voita.github.io/nlp\\_course/seq2seq\\_and\\_attention.html](https://lena-voita.github.io/nlp_course/seq2seq_and_attention.html) (дата обращения: 10.06.2023).
12. PyTorch: что за фреймворк и для чего он нужен, обзор // Skillfactory media. – URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/pytorch/> (дата обращения: 30.03.2023).
13. Natural Language Processing: Bleu Score | Baeldung on Computer Science // Baeldung. – URL: <https://www.baeldung.com/cs/nlp-bleu-score> (дата обращения: 07.06.2023).
14. Понимание оценки BLEU в кастомизированном машинном переводе // Хабр. – URL: <https://www.baeldung.com/cs/nlp-bleu-score> (дата обращения: 07.06.2023).
15. Дыков, М. А. Представление документа в виде вектора ключевых фраз для решения задачи поиска по уровню техники в описаниях патентов / М. А. Дыков, А. Г. Кравец, Д. М. Коробкин, С. С. Укустов, О. И. Стрелков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 1. – С. 148–154.
16. Selenium WebDriver // Digital Ocean. – URL: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/selenium-webdriver> (дата обращения: 05.12.2022).
17. Beautiful Soup Documentation – Beautiful Soup 4.4.0 documentation // Leonard Richardson. – URL: <https://beautiful-soup-4.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 05.12.2022).
18. NLTK: Natural Language Toolkit // NLTK Project. – URL: <https://www.nltk.org/> (дата обращения: 11.01.2023).
19. spaCy Industrial-strength Natural Language Processing in Python // Explosion. – URL: <https://spacy.io/> (дата обращения: 11.01.2023).
20. Козина, С. А. Архитектура системы формирования единой базы знаний по физической тематике / С. А. Козина, Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – № 1 (61). – С. 27–37.

#### References

1. Features of translation of patent documentation. *ScientificTranslations.rf*. Available at: [https://научные\\_переводы.рф/perevod\\_patentov/](https://научные_переводы.рф/perevod_patentov/) (accessed 06.05.2023).
2. Translation of patents – services of professional translators of technical texts. *Translation Bureau "Flarus"*. Available at: <http://www.patent-translation.ru/> (accessed 06.05.2023).
3. Features of translation of patent documentation. *Effectiff Company – Translation Bureau in Moscow*. Available at: <https://www.effectiff.com/node/358> (accessed 06.05.2023).
4. Trinozhenko, M. D., Goncharova, Yu. L. Specificity of translation of patent literature. *Young researcher of the Don*, 2016, no. 1 (1).
5. WIPO Translate (WIPO Translator). *WIPO*. Available at: <https://www.wipo.int/wipo-translate/ru/> (accessed 06.05.2023).
6. EPO – Patent Translate // EPO Available at: <https://www.epo.org/searching-for-patents/helpful-resources/patent-translate.html> (accessed 06.05.2023).
7. Patsnap | Best Patent Search Tool. *PatSnap*. Available at: <https://www.patsnap.com/> (accessed 06.05.2023).
8. What is ClickHouse. *ClickHouse*. Available at: <https://clickhouse.com/docs/ru> (accessed 06.05.2023).
9. Korobkin, D. M., Fomenkov, S. A., Kozina, S. A., Golovanchikov A. B. Analysis of a patent array using a combination of Clickhouse and HDFS1. *Mathematical methods in technologies and engineering*, 2023, no. 3, pp. 94–99.
10. Dzizawa, E. T., Akhmedov, K. M. Big data and Hadoop: a review report. *Bulletin of the Master's degree*, 2021, vol. 1, no. 1 (112), pp. 30–32.
11. Sequence to Sequence (seq2seq) and Attention. *Lena Voita*. Available at: [https://lena-voita.github.io/nlp\\_course/seq2seq\\_and\\_attention.html](https://lena-voita.github.io/nlp_course/seq2seq_and_attention.html) (accessed 10.06.2023).
12. PyTorch: what is the framework and what is it for, review. *Skillfactory media*. Available at: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/pytorch> (accessed 30.03.2023).
13. Natural Language Processing: Bleu Score | Baeldung on Computer Science. *Baeldung*. Available at: <https://www.baeldung.com/cs/nlp-bleu-score> (accessed 06.07.2023).
14. Understanding BLEU evaluation in customized machine translation. *Habr*. Available at: <https://www.baeldung.com/cs/nlp-bleu-score> (accessed 06.07.2023).
15. Dykov, M. A., Kravets, A. G., Korobkin, D. M., Ukustov, S. S., Strelkov O. I. Representation of a document in the form of a vector of key phrases for solving the problem of searching for prior art in patent descriptions. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2014, no. 1, pp. 148–154.
16. Selenium WebDriver. *Digital Ocean*. Available at: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/selenium-webdriver> (accessed 05.12.2022).
17. Beautiful Soup Documentation – Beautiful Soup 4.4.0 documentation. *Leonard Richardson*. Available at: <https://beautiful-soup-4.readthedocs.io/en/latest/> (accessed 05.12.2022).
18. NLTK: Natural Language Toolkit. *NLTK Project*. Available at: <https://www.nltk.org/> (accessed 11.01.2023).
19. spaCy Industrial-strength Natural Language Processing in Python. *Explosion*. Available at: <https://spacy.io/> (accessed 11.01.2023).
20. Kozina, S. A., Korobkin, D. M., Fomenkov, S. A., Kolesnikov, S. G. Architecture of a system for forming a unified knowledge base on physical topics. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2023, no. 1 (61), pp. 27–37.

Статья поступила в редакцию 05.11.2023; одобрена после рецензирования 13.12.2023; принята к публикации 16.02.2024.

The article was submitted 05.11.2023; approved after reviewing 13.12.2023; accepted for publication 16.02.2024.

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

## **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

УДК: 004.942; 004.422.8; 621.396.96

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНДИКАТОРА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ КРУГОВОГО ОБЗОРА**

*Коновской Алексей Сергеевич*, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), филиал «Взлет» в г. Ахтубинске, 416501, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5,

студент, ORCID: 0000-0001-6439-2822, e-mail: konovskoy01@mail.ru

*Рутковский Сергей Алексеевич*, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), филиал «Взлет» в г. Ахтубинске, 416501, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5,

студент, ORCID: 0009-0008-4587-4189, e-mail: sergeirutcovsky@gmail.com

*Нестеров Сергей Васильевич*, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), филиал «Взлет» в г. Ахтубинске, 416501, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5,

заведующий кафедрой, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0009-0003-8143-0730, e-mail: nesterov.vzlet@mail.ru

Существующие методы изучения студентами основ радионавигации, радиолокации, систем управления и радиоэлектронной борьбы в рамках обучения по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» и обучения операторов обзорных радиолокационных станций ограничены по возможностям или при изучении тратится технический ресурс обзорных радиолокационных станций. В данной работе приводится описание разработанной в филиале «Взлет» Московского авиационного института компьютерной модели индикатора радиолокационной станции кругового обзора, которую предполагается использовать при изучении ряда дисциплин, а также обучении операторов индикаторов обзорных радиолокационных станций кругового обзора. Представлена реализация модели в виде частей программного кода, а также результаты экспериментов по моделированию радиолокационной обстановки в простых и сложных помеховых ситуациях. Предложенная модель индикатора обзорных радиолокационных станций кругового обзора обладает большим потенциалом дальнейшего развития по совершенствованию радиолокационной обстановки и приближению её к более реальным обстановкам.

**Ключевые слова:** радиолокационная станция кругового обзора, тренажёрный имитатор, радионавигация, радиолокация, MATLAB

### **SIMULATION OF THE OPERATION OF THE ALL-ROUND VIEW INDICATOR OF A RADAR STATION**

*Konovskoj Aleksej S.*, Moscow Aviation Institute (National Research University), branch “Vzlet” in Akhtubinsk, 5 Dobrolyubov St., Akhtubinsk, Astrakhan region, 416501, Russian Federation, student, ORCID: 0000-0001-6439-2822, e-mail: konovskoy01@mail.ru

*Rutkovskij Sergej A.*, Moscow Aviation Institute (National Research University), branch “Vzlet” in Akhtubinsk, 5 Dobrolyubov St., Akhtubinsk, Astrakhan region, 416501, Russian Federation, student, ORCID: 0009-0008-4587-4189, e-mail: sergeirutcovsky@gmail.com

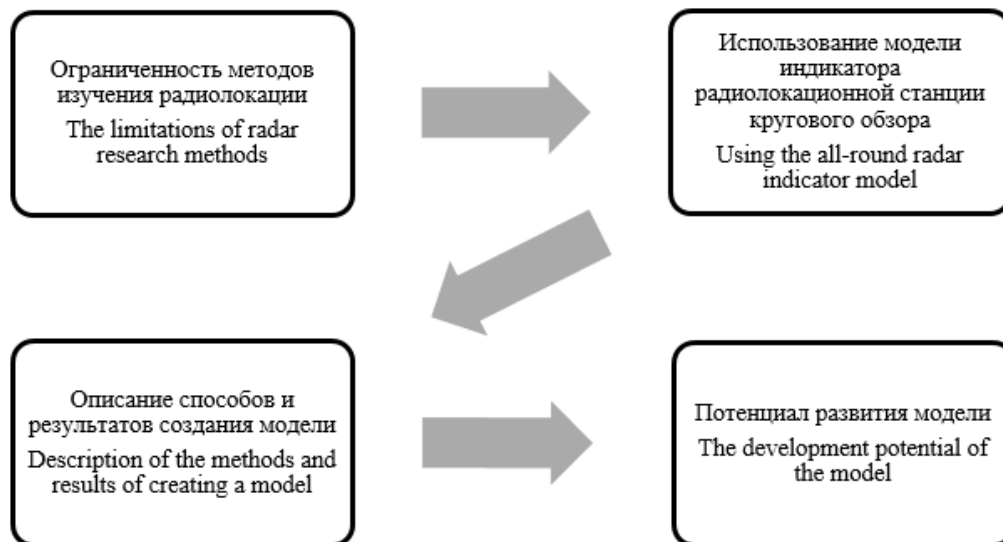
*Nesterov Sergej V.*, Moscow Aviation Institute (National Research University), branch “Vzlet” in Akhtubinsk, 5 Dobrolyubov St., Akhtubinsk, Astrakhan region, 416501, Russian Federation, head of department, Doct. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0009-0003-8143-0730, e-mail: nesterov.vzlet@mail.ru

The existing methods of students studying the basics of radio navigation, radar, control systems and electronic warfare within the framework of training in the specialty “Radio electronic systems and complexes” and training operators of surveillance radar stations (radars) are limited in capabilities or the technical resource of the radar is spent during the study. This paper describes a computer model of the all-round radar indicator developed at the Vzlet branch of Moscow Aviation Institute, which is supposed to be used in the study of a number of disciplines as well as training

operators of the all-round radar indicators. The implementation of the model in the form of parts of program code is presented, as well as the results of experiments on simulating the radar environment in simple and complex jamming situations. The proposed model of the all-round visibility indicator has great potential for further development to improve the radar situation and bring it closer to more realistic situations.

**Keywords:** all-round radar station, training simulator, radio navigation, radar, MATLAB

Graphical annotation (Графическая аннотация)



## ВВЕДЕНИЕ

Процесс подготовки инженерных кадров в аэрокосмической отрасли является непрерывным [1], при этом использование математических моделей различных систем авиационного и специального оборудования является общепринятым [2].

Однако изучение построения и функционирования радиолокационных станций (РЛС), формирования изображения на индикаторе кругового обзора (ИКО) в рамках обучения студентов по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» проводится в главных вузах страны исключительно в формате лекций. Подготовка операторов РЛС проводится на реальных, действующих РЛС в режиме обучения, что приводит к трате технического ресурса.

Для того чтобы сформировать у студентов и операторов РЛС соответствующий уровень компетенций на оборудовании, близком к реальному, но доступном и не тратящим технический ресурс дорогостоящей техники, используется программный комплекс, позволяющий имитировать радиолокационную обстановку в различных помеховых условиях. Оператор отвечает за правильную эксплуатацию доверенной им техники [3], и потому немаловажным является обеспечение доступности разработанной модели для будущих и действующих инженеров и операторов с целью формирования необходимого уровня компетенций [4–6].

В настоящей работе описывается компьютерная модель индикатора кругового обзора. Несмотря на то, что компания The MathWorks (США), разработавшая пакет прикладных программ для технических вычислений MATLAB, с 5 марта 2022 г. приостановила свою деятельность в России и отозвала лицензии у российских студентов и университетов [7], данная модель разработана в среде MATLAB [8] с задействованием средств графического пользовательского интерфейса MATLAB App Designer [9]. Это возможно благодаря тому, что ныне в России активно развито нелегальное использование программного обеспечения (ПО) из «недружественных» стран, а с 5 марта 2022 г. активно ведутся разговоры о легализации такого использования для зарубежного ПО [10].

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ИНДИКАТОРА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ КРУГОВОГО ОБЗОРА

Пользовательское окно компьютерной модели ИКО имеет простой визуальный вид, позволяющий на адаптивном уровне понять функционирование работы модели (рис. 1).

При работе с моделью в пользовательском окне устанавливаются следующие условия моделирования:

1. В панели «Выбор моделируемой ситуации» выбирается соответствующая заданию модель движения цели: цель движется по прямой в направлении РЛС («Движение цели по радиусу»), цель движется по прямой не в направлении РЛС («Движение цели в произвольном направлении»), цель не движется («Нахождение на месте») (рис. 2).

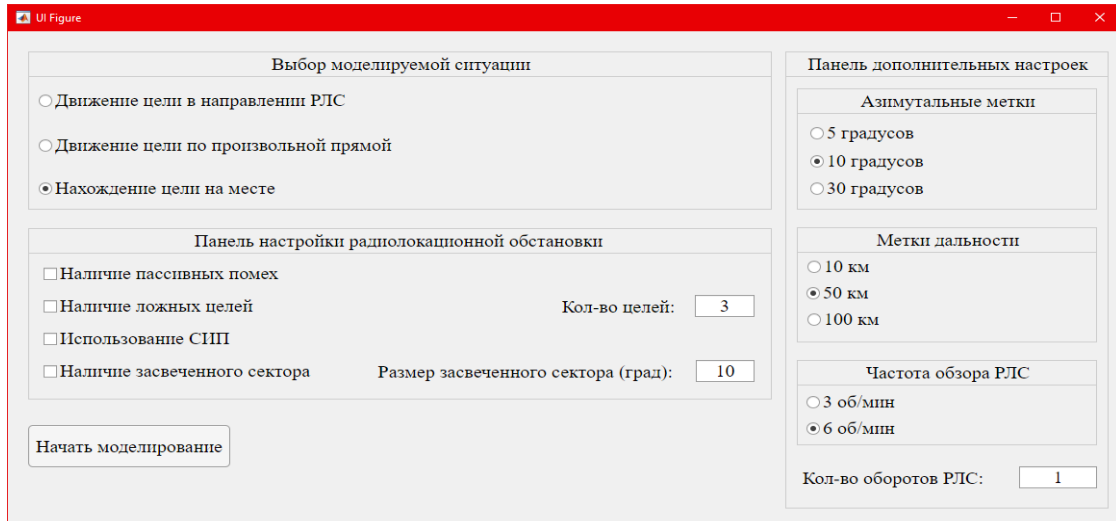


Рисунок 1 – Пользовательское окно компьютерной модели индикатора кругового обзора

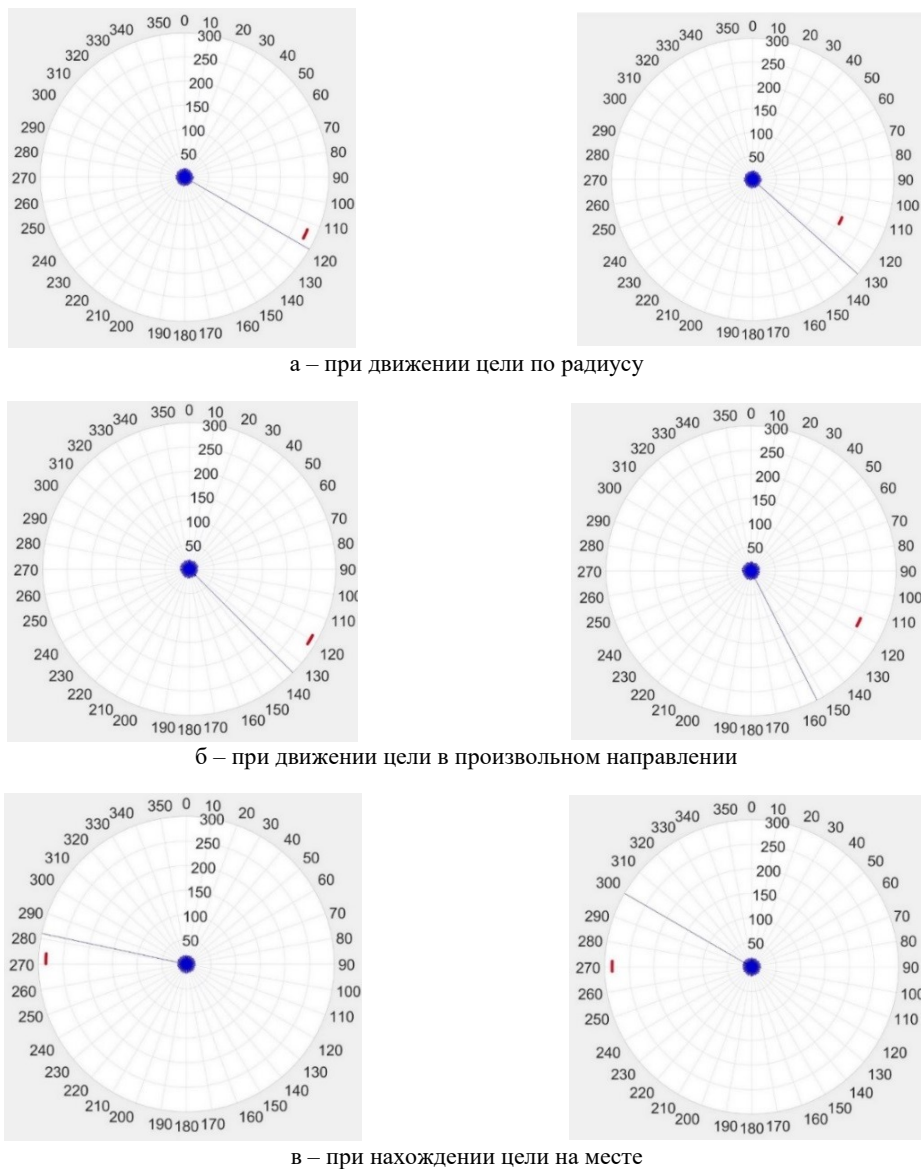


Рисунок 2 – Модель индикатора радиолокационной станции кругового обзора при различных движениях цели

2. В панели настройки радиолокационной обстановки задается отображаемая радиолокационная обстановка: наличие или отсутствие большого отражающего объекта (облака); наличие или отсутствие ложных целей, их количество можно задавать; наличие или отсутствие синхронных импульсных помех (СИП); наличие или отсутствие засвеченного сектора ИКО, размер сектора также можно задавать.

3. В панели дополнительных настроек возможно задавать частоту повторения азимутальных меток, меток дальности, частоту обзора РЛС. Также в соответствующем окне вводится количество оборотов РЛС (рис. 1). Вводимое число должно быть натуральным.

При нажатии кнопки «Запуск» производится моделирование работы ИКО в соответствии с теоретическими положениями радиолокации, радионавигации, радиоэлектронной борьбы и радиосистем управления (рис. 3) [6, 11–13]. Важно отметить, что реальный индикатор имеет желто-зеленый цвет, для наглядности было решено использовать синий и красный. Истинная цель изображена красным. Но при настройке модели можно выбрать любые цвета.

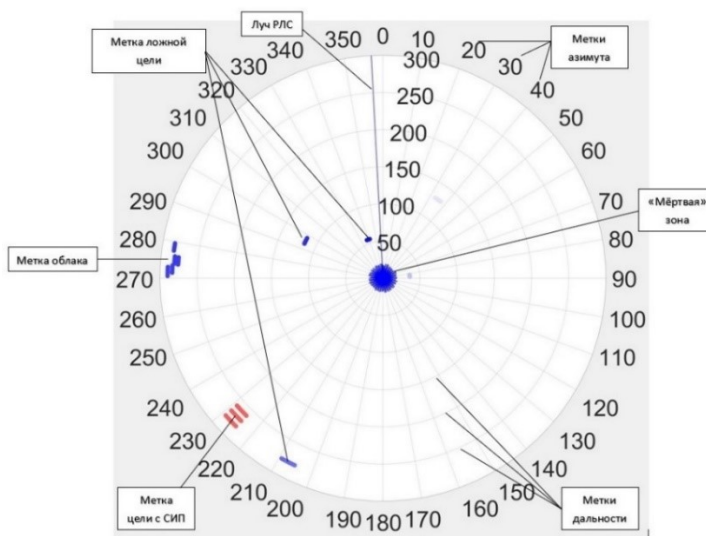


Рисунок 3 – Экран модели индикатора радиолокационной станции кругового обзора

### СПОСОБЫ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ

Наибольшие затруднения вызвали моделирование отметок целей, засвеченного сектора от активных помех и движение цели, пересекающей поле РЛС с изменением расстояния.

Отметки от точечных целей, а именно такими целями являются летательные аппараты в сравнении с дальностью работы РЛС, на экране ИКО имеют вид дужек, поскольку цель за время облучения можно считать практически неподвижной, а изображение цели образуется большим числом точек, и все эти точки находятся на одинаковом расстоянии от центра индикатора. Отметка цели должна повторять метки дальности по форме, потому формирование меток цели сводится к построению дуги окружности, имеющей радиус, равный расстоянию  $R_c$  от РЛС до цели (рис. 4 и 5).

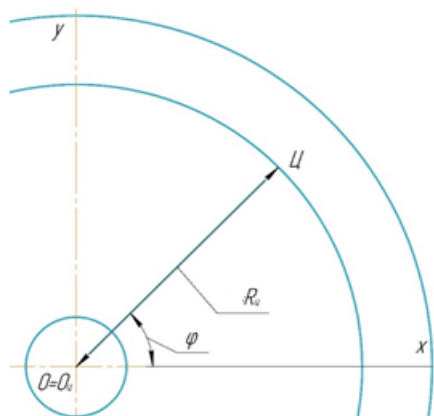


Рисунок 4 – К формированию отметки цели:  $R_c$  – расстояние от РЛС до цели;  $\varphi$  – угловая координата центра цели

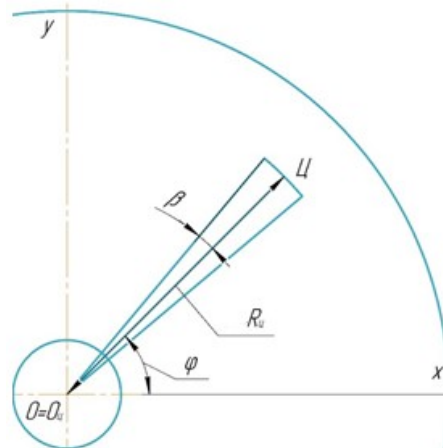


Рисунок 5 – К расчету координат точек дуги цели

Так как известна радиальная координата центра цели  $R_c$  и, соответственно, радиальная координата каждой точки дуги цели, то достаточно измерять угловую координату точки в дуге окружности цели  $\beta$  в полярной системе координат цели, откладываемую относительно угловой координаты центра цели  $\varphi$  (рис. 5), что приводит к уменьшению нагрузки на ПК при работе модели. В свою очередь, был сделан вывод о том, что можно моделировать метки целей абсолютно любых форм.

Данный способ формирования отметок цели является проще, чем описанные методы [14].

Формирование меток целей в программном представлении изображено на рисунке 6. Пример отображения цели на ИКО представлен на рисунке 3.

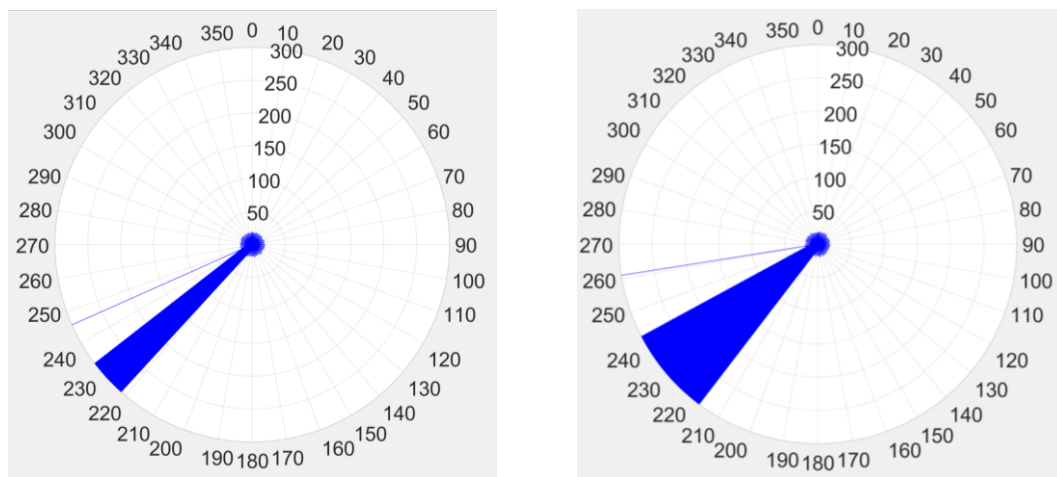
```

% Определение 5ти радиусов Nd и углов Td для построения цели в виде дуги
Rd = abs(x(1)); % Радиус дуги (цели)
for j = 1:q % Перебор числа точек в дуге цели
    Td(j) = y(1)+(j-5)*pi/400; % Массив углов для точек цели - угол бетта
    if Td(j) <= 0
        Td(j) = Td(j) + 2*pi;
    end
    Nd(j) = Rd; % радиусы точек цели
end

```

Рисунок 6 – Программное представление формирования дуги цели

Засвеченный сектор ИКО возникает вследствие наличия активных помех в основном лепестке диаграммы направленности антенны (ДНА), что позволяет грубо определить направление на источник помех, однако дальность до него определить невозможно; также невозможно наблюдать отметки целей (рис. 7а). Засвеченный помехами сектор может быть шире основного лепестка ДНА, если помехи значительны по величине и принимаются вне основной ширины ДНА, а также ее боковыми лепестками (рис. 7б). При дальнейшем повышении интенсивности помех на экране ИКО могут быть видны большие засвеченные помехами секторы, в которых нельзя различить отметки от целей. Чем выше плотность мощности помех, тем большим числом боковых лепестков ДНА они принимаются и тем шире засвеченные ими секторы, вплоть до полного засвечивания экрана.

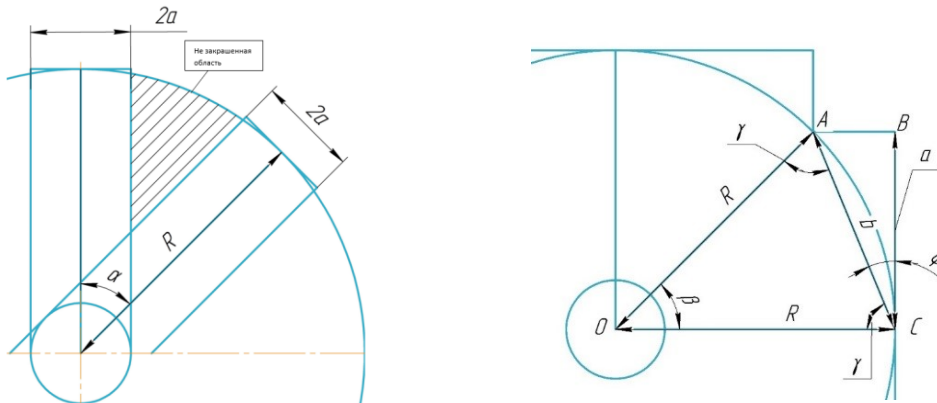


а – засвеченный сектор равен 10 градусам

б – засвеченный сектор равен 20 градусам

Рисунок 7 – Вид модели индикатора радиолокационной станции кругового обзора при различных уровнях шумов

Засвеченный сектор ИКО моделируется с помощью линий, имеющих некую толщину, равную  $2\alpha$ . Для моделирования засвеченного сектора необходимо определить угол  $\alpha$  между двумя этими линиями, так как если угол между этими линиями больше  $\alpha$ , то на расстояниях, близких к максимальной дальности действия РЛС (рис. 8а), будут незакрашенные области; если взять угол меньше  $\alpha$ , то незакрашенных областей не будет, но это приведёт к формированию дополнительных линий, т. е. увеличится нагрузка на ПК. На рисунке 8б представлен рисунок для расчёта угла  $\alpha$ .



а – к пониманию определения оптимального угла

(б) – к расчёту оптимального угла

Рисунок 8 – К моделированию засвеченного сектора индикатора

Отрезок  $b$  (рис. 8б) как хорда окружности определяется по формуле (1):

$$b = 2R \sin \frac{\beta}{2}. \quad (1)$$

Отрезок  $b$  как сторона треугольника ABC определяется по формуле (2):

$$b = \frac{a}{\cos \varphi}, \quad (2)$$

где угол  $\varphi$  определяется как

$$\varphi = 90 - \gamma = 90 - \frac{180 - \beta}{2} = \frac{\beta}{2}.$$

Из (1) и (2) получено следующее уравнение:

$$2R \sin \frac{\beta}{2} = \frac{a}{\cos \frac{\beta}{2}},$$

откуда

$$\beta = \arcsin \left( \frac{a}{R} \right).$$

Таким образом, оптимальный угол между двумя прямыми толщиной  $2a$  равен  $2 \arcsin \left( \frac{a}{R} \right)$ , а засвеченный сектор формируется соответствующим образом (рис. 9).

```

% Засвет ИКО %
if app.CheckBox_4.Value == 1
    ZO = ((app.EditField_2.Value*pi)/180)*2; % Размер засвечиваемой области
    % Кол-во оптимальных углов, которое помещается в заданном секторе, который нужно закрасить
    B = (ZO/(2*asin(0.5/100))-mod(ZO,(2*asin(0.5/100)))/(2*asin(0.5/100))+2);
    azZ = rand(1)*2*pi; % Угол, в котором появляется засвет
    if ZO>0 % эта строчка для того, чтоб он не строил 1 полосу засвета
        for i=1:1:B
            r1(i) = 0; % Толщина линий, формирующий засвет
            % rz и tz - это радиус и угол точек, по которым строятся прямые, составляющие засвет
            rz(i,1) = 100;
            tz(i,1) = azZ-(i-1)*atan(0.5/100);
            rz(i,2) = 10;
            tz(i,2) = azZ-(i-1)*atan(0.5/100);
        end
    end
end
end

```

Рисунок 9 – Программное представление формирования засвеченного сектора

Для моделирования движения цели по произвольной прямой, т. е. движения цели по азимуту с изменением расстояния до РЛС, требуется определить уравнение прямой, пересекающей окружность в точках C и D в полярных координатах. Начальными условиями являются расстояние от центра окружности до этой прямой  $L$  и угол  $\alpha$ , в направлении которого отсчитывается расстояние  $L$  (рис. 10).

Уравнение прямой в прямоугольной системе координат имеет вид:

$$y = kx + b,$$

где  $x, y$  – координаты по осям  $x$  и  $y$  соответственно;

$k$  – угловой коэффициент, определяемый как  $k = \operatorname{tg} \gamma$ ;

$b$  – ордината точки пересечения отрезка CD с осью  $y$ ;

$\gamma$  – угол наклона отрезка CD к оси  $x$ .

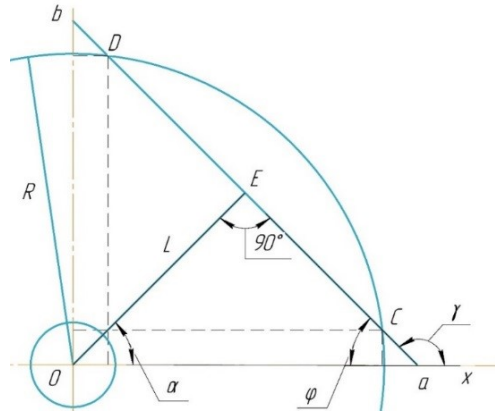


Рисунок 10 – К формированию пути движения цели

Разность углов  $\gamma$  и  $\alpha$  всегда составляет  $90^\circ$  вне зависимости от четверти прямоугольной системы координат:

$$\gamma = \alpha + 90^\circ.$$

Тогда можно записать, что

$$k = \operatorname{tg} \gamma = -\operatorname{ctg} \alpha. \quad (3)$$

Очевидно, что

$$b = \frac{L}{\sin \alpha}.$$

Таким образом, уравнение прямой в полярной системе координат с учетом вышеописанных преобразований имеет вид

$$r \sin \beta = -r \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos \beta + \frac{L}{\sin \alpha},$$

где  $r$  – текущие радиальные координаты точек прямой;

$\beta$  – текущие угловые координаты точек прямой.

Из уравнения выше определяется зависимость текущих радиальных координат  $r$  точек (рис. 11), формирующих прямую движения цели, которая определяется по формуле (4):

$$r = \frac{L}{\sin \alpha (\sin \beta + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos \beta)} = \frac{L}{\cos(\alpha - \beta)}. \quad (4)$$

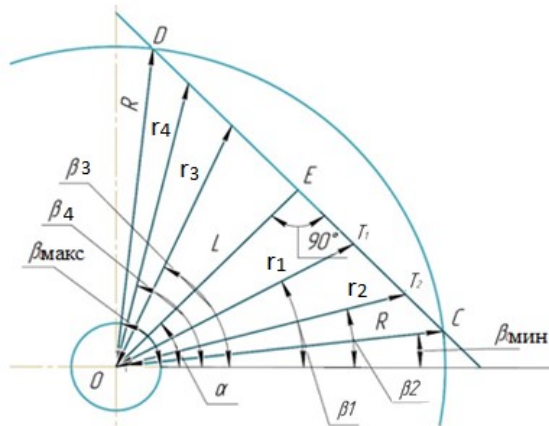


Рисунок 11 – К формированию пути движения цели

Радиальные координаты конечных точек прямой движения цели (отрезок DC) равны дальности  $R$  ( $r = R$ ), а угловые координаты  $\beta$  – углом  $DOx$  ( $\beta = \beta_{\max}$ ) и  $COx$  ( $\beta = \beta_{\min}$ ).

Согласно выражению (4),

$$R = \frac{L}{\cos(\alpha - \beta_{\max})} = \frac{L}{\cos(\alpha - \beta_{\min})}.$$

Таким образом, угловые координаты точек D ( $\beta_{\max}$ ) и C ( $\beta_{\min}$ ) равны соответственно

$$\beta_{\max, \min} = \alpha \pm \arccos \frac{L}{R}.$$

Необходимо обеспечить равномерное движение цели по заданной траектории (с постоянной линейной скоростью). Для этого требуется обеспечить изменение угловой координаты цели с переменной угловой скоростью, так как при постоянной угловой скорости за одинаковое время цель на расстояниях, близких к центру ИКО, будет проходить меньшее расстояние, чем на расстояниях, близких к границе действия РЛС (рис. 12).

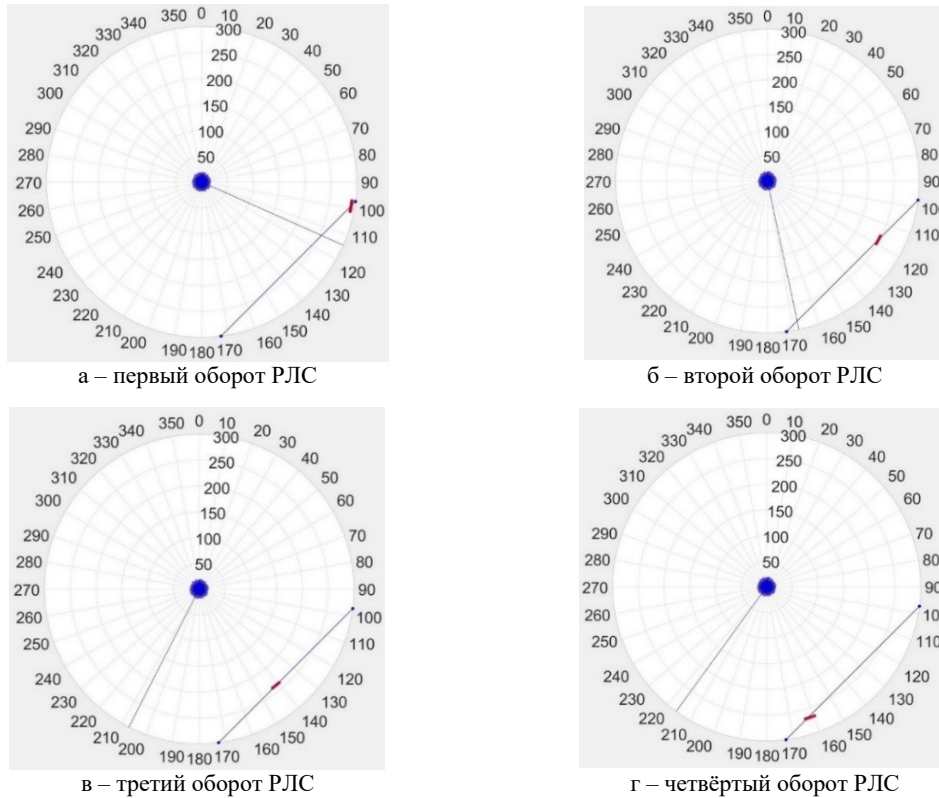


Рисунок 12 – Моделирование движения цели в произвольном направлении

Пусть при каждом новом отсчете цель проходит одно и то же расстояние  $S$ . Формула расстояния  $S$  между двумя точками  $T_1$  и  $T_2$ , соответствующего двум соседним отсчетам (рис. 11), имеет вид

$$\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} = S$$

или

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 = S^2, \tag{5}$$

где  $x_1$  и  $y_1$  – координаты точки  $T_1$  в прямоугольной системе координат;

$x_2$  и  $y_2$  – координаты точки  $T_2$  в прямоугольной системе координат.

Пусть координаты точки отсчета положения цели  $T_1$  известны и равны

$$\begin{aligned} x_1 &= r_1 \cos \beta_1, \\ y_1 &= r_1 \sin \beta_1, \end{aligned}$$

где  $r_1$  – радиальная координата точки  $T_1$ ;

$\beta_1$  – угловая координата точки  $T_1$ .

Подставив уравнение прямой в (5), получим

$$(x_1 - x_2)^2 + (kx_1 - kx_2)^2 = S^2,$$

где  $x_2$  – абсцисса координаты точки следующего положения цели  $T_2$ .

Данное уравнение является квадратным уравнением

$$x_2^2 - 2x_1x_2 + x_1^2 - \frac{S^2}{(1+k^2)^2} = 0,$$

из которого в соответствии с (3) следует

$$x_2 = x_1 \pm \frac{S}{\sqrt{1+k^2}} = x_1 \pm S \sin \alpha. \tag{6}$$

В то же время координату  $x_2$  можно определить по формуле (7):

$$x_2 = r_2 \cos \beta_2, \tag{7}$$

где  $r_2$  – радиальная координата точки  $T_2$ ;

$\beta_2$  – угловая координата точки  $T_2$ .

При подстановке (4) в данное выражение следует, что

$$x_2 = \frac{L}{\cos(\alpha - \beta_2)} \cos \beta_2$$

или

$$tg \beta_2 = \frac{L}{x_2 \sin \alpha} - ctg \alpha.$$

Тогда с учетом (6) зависимость угла  $\beta_2$  от координаты  $x_1$  предыдущего отчета определяется по формуле (8):

$$\beta_2 = \arctg \left[ \frac{L}{(x_1 \pm S \sin \alpha) \sin \alpha} - ctg \alpha \right]. \quad (8)$$

Таким образом, из (7) и (8) можно определить полярные координаты точки, находящейся на расстоянии  $S$  от предыдущей, зная уравнение прямой, на которой составляют эти две точки и координаты предыдущей точки.

При этом если  $\beta_2 < \beta_1$ , то

$$\beta_2 = \arctg \left[ \frac{L}{(x_1 + S \sin \alpha) \sin \alpha} - ctg \alpha \right] = \arctg \left[ \frac{L}{(r_1 \cos \beta_1 + S \sin \alpha) \sin \alpha} - ctg \alpha \right],$$

а если  $\beta_2 > \beta_1$ , то

$$\beta_2 = \arctg \left[ \frac{L}{(x_1 - S \sin \alpha) \sin \alpha} - ctg \alpha \right] = \arctg \left[ \frac{L}{(r_1 \cos \beta_1 - S \sin \alpha) \sin \alpha} - ctg \alpha \right].$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная в филиале «Взлёт» МАИ в г. Ахтубинске компьютерная модель ИКО РЛС на данный момент уже может использоваться в обучении студентами и операторами РЛС. Также разработанная модель обладает потенциалом дальнейшего развития в области создания более сложных помеховых обстановок, оптимизации программного кода, разработки более сложных траекторий движения цели, использования тактико-технических реально действующих РЛС.

### Список источников

1. Качалин, А. М. Комплексная система для целевой подготовки и повышения квалификации в аэрокосмической отрасли / А. М. Качалин, О. Н. Задорожная // Труды МАИ. – 2014. – № 75. – URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/dd9/dd96a8e481505e575a8259b567908756.pdf?lang=ru&referer=https%3A%2F%2Fclick.mail.ru%2F>.
2. Князев, А. С. Использование имитатора многофункционального индикатора самолета в учебном процессе вуза / А. С. Князев, А. С. Антоненко, Е. Д. Арбузов, А. Д. Чеботарев // Труды МАИ. – 2022. – № 123. – URL: [https://trudymai.ru/upload/iblock/6f3/z1kumam3ikxw7m5z5fjwwxnp1vfst5h13/Knyazev\\_i-dr..pdf?lang=ru&referer=https%3A%2F%2Fclick.mail.ru%2F](https://trudymai.ru/upload/iblock/6f3/z1kumam3ikxw7m5z5fjwwxnp1vfst5h13/Knyazev_i-dr..pdf?lang=ru&referer=https%3A%2F%2Fclick.mail.ru%2F).
3. Косарукин, В. А. Основы формирования инженерной этики / В. А. Косарукин // Труды МАИ. – 2010. – № 37. – URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/244/osnovy-formirovaniya-inzhenernoy-etiki.pdf?lang=ru&issue=37>.
4. Кутарова, Е. И. Модель процесса обучения студентов радиотехнического направления подготовки дисциплинам естественнонаучного цикла / Е. И. Кутарова, М. Н. Рыжкова // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №2. с. 68-75.
5. Полянсков, Ю. В. Разработка и реализация программ формирования компетенций выпускников ВУЗа / Ю. В. Полянсков, И. А. Санников, В. Л. Леонтьев, Д. Ю. Шабалкин, А. Н. Евсеев // Труды МАИ. – 2013. – № 71. – URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/0e2/0e2ddabc1735cce06f3ec5bd75e7e7f5.pdf?lang=ru&issue=71>.
6. Чекушкин, В. В. Система имитации радиолокационной информации и тренировки операторов / В. В. Чекушкин, М. А. Царьков, А. В. Антуфьев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 1. – С. 15–21.
7. The MathWorks (Matlab) приостановил деятельность в России с 05 марта 2022 г. – URL: <https://всеэппомним.рф/company/704-the-mathworks-matlab.html> (дата обращения: 03.02.2022).
8. Дьяконов, В. П. MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Самоучитель / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 768 с.
9. Math Works. – URL: <http://matlab.ru/> (дата обращения: 05.02.2022).
10. Интернет-издание о высоких технологиях C-news. – URL: [https://www.cnews.ru/news/top/2022-03-05\\_gossiyanam\\_fazreshat\\_legalno](https://www.cnews.ru/news/top/2022-03-05_gossiyanam_fazreshat_legalno) (дата обращения: 12.02.2023).
11. Радиотехнические системы : учебник для студ. высш. учебн. заведений / [Ю. М. Казаринов и др.] ; под ред. Ю. М. Казаринова. – Москва : Издательский центр «Академия», 2008. – 592 с.
12. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы : учебник для вузов / П. А. Бакулев. – Москва : Радиотехника, 2004. – 320 с.
13. Нестеров, С. В. Анализ обстановки, отображаемой индикатором кругового обзора радиолокационной станции : учеб. пос. – Москва : Изд-во МАИ, 2013. – 36 с.
14. Антуфьев, Р. В. Патент РФ на изобретение № 2489753. Способ и устройство имитации радиолокационной информации / Р. В. Антуфьев, М. С. Бобров, Г. Г. Пискунов, В. В. Чекушкин, И. В. Пантелеев, М. А. Царьков // Изобретения. Полезные модели. – 2013. – Бюл. № 22.

#### References

1. Kachalin, A. M., Zadorozhnaya, O. N. Complex system for targeted training and advanced training in the aerospace industry. *Proceedings of MAI*, 2014, no. 75. Available at: <https://trudymai.ru/upload/iblock/dd9/dd96a8e481505e575a8259b567908756.pdf?lang=ru&referer=https%3A%2F%2Fclick.mail.ru%2F>.
2. Knyazev, A. S., Antonenko, A. S., Arbuzov, E. D., Chebotarev, A. D. The use of a multifunctional aircraft indicator simulator in the educational process of a university. *Proceedings of MAI*, 2022, no. 123. Available at: [https://trudymai.ru/upload/iblock/6f3/z1kymam3ikxw7m5zfwwxnp1vfst5hl3/Knyazev\\_i-dr..pdf?lang=ru&referer=https%3A%2F%2Fclick.mail.ru%2F](https://trudymai.ru/upload/iblock/6f3/z1kymam3ikxw7m5zfwwxnp1vfst5hl3/Knyazev_i-dr..pdf?lang=ru&referer=https%3A%2F%2Fclick.mail.ru%2F).
3. Kosarukin, V. A. Fundamentals of engineering ethics formation. *Proceedings of MAI*, 2010, no. 37. Available at: <https://trudymai.ru/upload/iblock/244/osnovy-formirovaniya-inzhenernoy-etiki.pdf?lang=ru&issue=37>.
4. Kutarova, E. I., Ryzhkova, M. N. Model of the process of teaching students of the radio engineering direction of training disciplines of the natural science cycle. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*, 2017, no. 2, pp. 68–75.
5. Polyanskov, Yu. V., Sannikov, I. A., Leontiev, V. L., Shabalkin, D. Yu., Evseev, A. N. Development and implementation of programs for the formation of competencies of university graduates. *Proceedings of MAI*, 2013, no. 71. Available at: <https://trudymai.ru/upload/iblock/0e2/0e2ddabc1735cce06f3ec5bd75e7e7f5.pdf?lang=ru&issue=71>.
6. Chekushkin, V. V., Tsarkov, M. A., Antufyev, A. V. System of imitation of radar information and training of operators. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*, 2016, no. 1, pp. 15–21.
7. *The MathWorks (Matlab) has suspended operations in Russia since March 05, 2022*. Available at: <https://всезапомним.рф/company/704-the-mathworks-matlab.html>.
8. Dyakonov, V. P. *MATLAB 7.\* / R2006 / R2007 : tutorial*. Moscow, DMK Press, 2008, 768 p.
9. *Math Works*. Available at: <http://matlab.ru/>.
10. *Internet publication about high technologies C-news*. Available at: [https://www.cnews.ru/news/top/2022-03-05\\_rossiyanam\\_razreshat\\_legalno](https://www.cnews.ru/news/top/2022-03-05_rossiyanam_razreshat_legalno).
11. Kazarinov, Yu. M. (ed.) et al. *Radio engineering systems : textbook for students of higher educational institutions*. Moscow, Publishing Center "Academy", 2008. 592 p.
12. Bakulev, P. A. *Radar systems : textbook for universities*. Moscow, Radiotekhnika, 2004. 320 p.
13. Nesterov, S. V. *Analysis of the situation displayed by the all-round indicator of the radar station : training manual*. Moscow, Publishing house of the Moscow Aviation Institute, 2013. 36 p.
14. Antufiev, R. V., Bobrov, M. S., Piskunov, G. G., Chekushkin, V. V., Panteleev, I. V., Carkov, M. A. *RF patent for invention no. 2489753. "Method and device for simulating radar information*, 2013, bul. no. 22.

Статья поступила в редакцию 11.01.2024; одобрена после рецензирования 06.01.2024; принята к публикации 08.01.2024.

The article was submitted 11.01.2024; approved after reviewing 06.01.2024; accepted for publication 08.01.2024.

УДК 004.932.2

### ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РАДИУСА КРУГЛОГО ФРАГМЕНТА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ВИБРАЦИИ ПО ПРИРАЩЕНИЮ ПЛОЩАДИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЭТОГО ФРАГМЕНТА

*Григорьев Алексей Валерьевич*, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40,  
кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-0847-8706, e-mail: a\_grigorev@mail.ru

В статье поставлена цель выработки критерия выбора радиуса тестового фрагмента круглой формы для виброизмерительной системы, анализирующей вибрационное размытие его изображения. Актуальность поставленной цели состоит в расширении функциональных возможностей виброизмерительной системы за счет измерения как сильных вибраций, так и слабых при минимизации погрешности измерений. Для обоснования взаимосвязи радиуса тестового фрагмента и измерительной погрешности применены методы математической статистики, сегментации изображений и численного моделирования. Проведен анализ состояния вопроса измерения параметров вибраций на основе анализа размытия изображения тестового фрагмента круглой формы. Составлена примерная схема измерения параметров вибрационных процессов на основе анализа размытия изображения тестового фрагмента круглой формы. Приведено описание этой схемы. Проведен анализ вибрационного перемещения тестового фрагмента круглой формы в плоскости объекта регистрирующего устройства по гармоническому закону. Проведена реконструкция такого вибрационного перемещения, представлена и описана ее графическая интерпретация. Проведена предметно ориентированная сегментация изображения тестового фрагмента круглой формы с вибрационным размытием при прямолинейном вибрационном перемещении в плоскости объекта регистрирующего устройства. Проведен сравнительный анализ погрешности измерения площади изображения, вносимой прямоугольным сегментом и полукруглыми сегментами. Введено понятие нормированной амплитуды вибрационного перемещения, которое применяется в качестве аргумента функции приведенной погрешности, когда в качестве нормирующего значения принимается радиус тестового фрагмента круглой формы. Введено, обосновано и конкретизировано понятие эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения по произвольной траектории. Выработана и обоснована рекомендация выбирать радиус тестового фрагмента минимальным при условии превышения им наибольшей ожидаемой эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения исследуемого элемента вибрирующей поверхности.

**Ключевые слова:** вибрация, круглая метка, изображение, размытие, динамика, калибровка, информационно-измерительная система, численное моделирование

### INFLUENCE OF THE RADIUS OF A CIRCULAR FRAGMENT ON THE ERROR OF MEASUREMENT OF VIBRATION INTENSITY BY INCREMENT IN THE IMAGE AREA OF THIS FRAGMENT

*Grigoryev Aleksey V.*, Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation,  
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-0847-8706, e-mail: a\_grigorev@mail.ru

The article sets the goal of developing a criterion for choosing the radius of a round test fragment for a vibration measuring system that analyzes the vibration blur of its image. The relevance of this goal is to expand the functionality of the vibration measuring system by measuring both strong and weak vibrations while minimizing measurement errors. To substantiate the relationship between the radius of the test fragment and the measurement error, methods of mathematical statistics, image segmentation and numerical modeling were used. An analysis of the state of the issue of measuring vibration parameters was carried out based on an analysis of the blurring of the image of a round test fragment. An approximate scheme for measuring the parameters of vibration processes has been compiled based on an analysis of the blurring of the image of a round test fragment. A description of this scheme is given. An analysis of the vibrational movement of a round test fragment in the plane of the recording device object was carried out according to the harmonic law. A reconstruction of such vibrational movement has been carried out, and its graphical interpretation is presented and described. An object-oriented segmentation of the image of a round test fragment with vibration blur was carried out during rectilinear vibration movement in the object plane of the recording device. A comparative analysis of the error in measuring the image area introduced by a rectangular segment and semicircular segments was carried out. The concept of a normalized vibration displacement amplitude is introduced, which is used as an argument of the reduced error function when the radius of a circular test fragment is taken as a normalizing value. The concept of equivalent amplitude of vibration movement along an arbitrary trajectory is introduced, justified and specified. A recommendation has been developed and justified to choose the minimum radius of the test fragment provided that it exceeds the largest expected equivalent amplitude of the vibrational movement of the test element of the vibrating surface.

**Keywords:** vibration, round mark, image, blur, dynamics, calibration, information-measuring system, numerical modeling

## ВВЕДЕНИЕ

Вибрационный контроль состояния объектов является актуальной проблемой. Это относится практически ко всем объектам, как техногенным, так и природным. В частности, применение такого контроля перспективно в плане повышения надежности и безопасности газотранспортных систем [14]. Системы вибрационного контроля перспективны также в смысле повышения сроков автоматизированного прогнозирования отказов электронной аппаратуры длительного функционирования [13]. Обнаружение дефектов и разрушительных процессов в их латентной фазе является задачей математической статистики, и в ней успешно применяются решения, отработанные в радиолокации [8]. Для обработки информации, полученной датчиками виброизмерительных систем, может применяться в том числе и нейросетевой инструментарий [7]. Виброизмерительная система входит как составная часть в информационно-измерительную и управляющую систему (ИИУС) для контроля состояния объектов [6]. В связи с вышесказанным, представляется перспективным научное направление, в котором для измерения параметров вибраций применяется анализ размытия изображения тестового фрагмента круглой формы с вибрационным размытием [10–12]. При этом применяется как морфологический анализ геометрических параметров (статьи [2], [4]), так и статистический (статья [5]). Сочетание этих методов при правильном подходе поддерживает синергетический эффект (статьи [1], [9]).

## ПРИМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ФРАГМЕНТА КРУГЛОЙ ФОРМЫ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВИБРАЦИОННОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ЕГО ОРИГИНАЛА В ПЛОСКОСТИ ОБЪЕКТА РЕГИСТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Примерная схема измерения вибрации по размытию изображения круглого фрагмента представлена на рисунке 1.

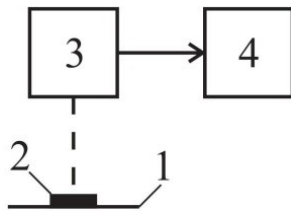


Рисунок 1 – Примерная схема измерения вибраций по размытию изображения круглого фрагмента

На поверхности 1, вибрацию которой предполагается контролировать, закрепляется фрагмент 2, имеющий круглую форму. Регистрирующее устройство 3 (например, видеокамера) формирует изображение фрагмента или видеопоток, который поступает в вычислительное устройство 4, где обрабатывается и анализируется.

Если вибрационное перемещение элемента поверхности осуществляется по гармоническому закону и прямолинейной траектории, то такое перемещение имеет ярко выраженную амплитуду и среднеквадратичное значение. Такое перемещение возможно, например, при применении вибростенда. В условиях эксплуатации техногенного объекта или жизненного цикла природного объекта вибрационная траектория является, как правило, эллиптической, а в некоторых случаях и более сложной. Интенсивность такой вибрации предлагается оценивать через интенсивность эквивалентной прямолинейной гармонической вибрации, в результате которой осуществляется такое же относительное приращение площади изображения тестового фрагмента круглой формы, какое и при исследуемом вибрационном процессе.

Примерная реконструкция изображения фрагмента круглой формы при прямолинейном вибрационном перемещении его оригинала в плоскости объекта регистрирующего устройства представлена на рисунке 2.

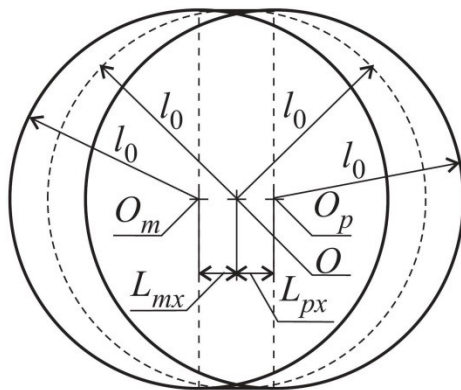


Рисунок 2 – Примерная реконструкция изображения фрагмента круглой формы при прямолинейном вибрационном перемещении его оригинала в плоскости объекта регистрирующего устройства

На рисунке 2 точка  $O$  – мгновенная фотография исследуемого элемента поверхности на исходной позиции вибрационного перемещения. Точки  $O_p$  и  $O_m$  – две крайние позиции вибрационного перемещения исследуемого элемента поверхности. Штриховыми линиями показаны контуры мгновенных фотографий тестового фрагмента на исходной и крайних позициях вибрационного перемещения. Контур полученного в результате размытия изображения показан сплошной основной линией.  $l_0$  – радиус мгновенной фотографии тестового фрагмента.  $L_{px}$  и  $L_{mx}$  – расстояния между точками  $O$  и  $O_p$  и  $O$  и  $O_m$ , соответственно. При прямолинейном гармоническом вибрационном перемещении элемента поверхности в плоскости объекта  $L_{mx} = L_{px}$ .

### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ АМПЛИТУДЫ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Изображение фрагмента круглой формы с вибрационным размытием, примерная реконструкция которого представлена на рисунке 2, состоит из трех областей: двух периферийных и центральной. Каждая из двух периферийных областей ограничена полуокружностью, радиус кривизны которой равен  $l_0$  и отрезком прямой, проходящим через центр кривизны этой полуокружности, симметричным относительно этого центра и имеющим длину  $2l_0$ . Центральная область имеет форму прямоугольника, одна из сторон которого  $2l_0$ , а другая –  $2L_{px}$ .

Погрешность дискретизации при измерении площади прямоугольной связной области существенно выше, чем при измерении круглой связной области. Это объясняется тем, что на периферии круга элементарные погрешности дискретизации со знаком «плюс» и со знаком «минус» частично компенсируют друг друга, а на периферии прямоугольника такого не происходит. Поэтому, чем большую долю площади размытого изображения составляет прямоугольник, тем большую погрешность эта часть вносит.

Численное моделирование позволило определить, каким образом погрешность дискретизации при измерении амплитуды вибрационного перемещения зависит от уровня этой амплитуды, измеренного в долях радиуса тестового круглого фрагмента. То есть в качестве аргумента функции принимается нормированная амплитуда вибрационного перемещения  $M_{pxN}$ :

$$M_{pxN} = \frac{M_{px}}{r_t}, \quad (1)$$

где  $r_t$  – радиус тестового круглого фрагмента.

Посредством численного моделирования получены функции  $\gamma_{Mpxd}$  от  $M_{pxN}$  при различных значениях  $S_{imt0}$ , где  $\gamma_{Mpxd}$  – приведенная погрешность дискретизации, которая образуется при измерении  $M_{px}$ ;  $S_{imt0}$  – площадь мгновенной фотографии тестового фрагмента. Другими словами,  $S_{imt0}$  – это то количество пикселей, которое приходится на цифровое изображение тестового фрагмента без вибрационного размытия. Графическая интерпретация этих функций представлена на рисунке 3.

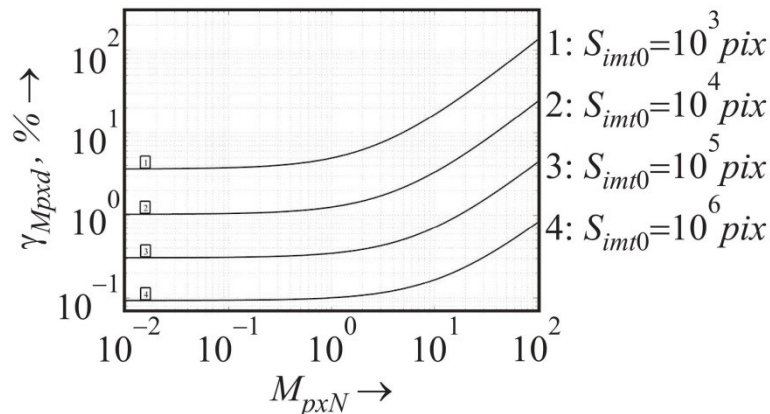


Рисунок 3 – Функции  $\gamma_{Mpxd}$  от  $M_{pxN}$  при различных значениях  $S_{imt0}$

Из рисунка 3 видно, что если максимальное ожидаемое значение амплитуды вибрационного процесса не превышает радиуса тестового фрагмента круглой формы, то погрешность дискретизации практически постоянна. Но как только амплитуда вибрации начинает превышать радиус, погрешность дискретизации резко возрастает. Поэтому радиус тестового фрагмента рекомендуется выбирать минимальным при условии гарантированного превышения им максимальной ожидаемой амплитуды контролируемого вибрационного перемещения.

### ЭКВИВАЛЕНТНАЯ АМПЛИТУДА ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТА ВИБРИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ

В статье [3] показано, что  $M_{px} \sim L_{px}$ , где  $M_{px}$  – амплитуда прямолинейного гармонического вибрационного перемещения элемента поверхности в плоскости объекта по оси абсцисс. Другими словами,

$$M_{px} = p_{Sxy} \cdot \delta S_{imtx}, \quad (2)$$

где  $M_{px}$  – амплитуда прямолинейного гармонического вибрационного перемещения в плоскости объекта регистрирующего устройства по оси абсцисс;

$p_{Sxy}$  – коэффициент отображения множества значений  $\delta S_{imtx}$  во множество значений  $M_{px}$ ;

$\delta S_{imtx}$  – относительное вибрационное приращение площади изображения тестового фрагмента круглой формы при его вибрационном перемещении в плоскости объекта регистрирующего устройства по оси абсцисс.

Кроме того,

$$M_{py} = p_{Sxy} \cdot \delta S_{imty}, \quad (3)$$

где  $M_{py}$  – амплитуда прямолинейного гармонического вибрационного перемещения в плоскости объекта регистрирующего устройства по оси ординат;

$\delta S_{imty}$  – относительное вибрационное приращение площади изображения тестового фрагмента круглой формы при его вибрационном перемещении в плоскости объекта регистрирующего устройства по оси ординат.

$$M_{pz} = p_{Sz} \cdot \delta S_{imtz}, \quad (4)$$

где  $M_{pz}$  – амплитуда прямолинейного гармонического вибрационного перемещения по нормали к плоскости объекта регистрирующего устройства по оси аппликат;

$p_{Sz}$  – коэффициент отображения множества значений  $\delta S_{imtz}$  во множество значений  $M_{pz}$ ;

$\delta S_{imtz}$  – относительное вибрационное приращение площади изображения тестового фрагмента круглой формы при его вибрационном перемещении по нормали к плоскости объекта регистрирующего устройства по оси аппликат.

В формулах (2) и (3) коэффициент отображения один и тот же  $p_{Sxy}$ . Это объясняется тем, что при вибрационном перемещении в плоскости объекта размытие изображения обусловлено непосредственно самим перемещением. При этом неважно, в каком направлении движение происходит: по оси абсцисс, по оси ординат или под каким-то непрямым и ненулевым углом к этим осям. При перемещении же элемента поверхности по оси аппликат перпендикулярно плоскости объекта размытие изображения тестового фрагмента обусловлено расфокусированием этого изображения, т. е. имеет несколько другую физическую природу. Однако при соответствующей настройке оптической системы регистрирующего устройства и при соответствующем выборе уровня порога бинаризации во многих случаях возможно добиться того, чтобы коэффициенты  $p_{Sxy}$  и  $p_{Sz}$  были равны между собой.

В настоящей статье предпринимается попытка обобщения формулы (2) на вибрационное перемещение по произвольной траектории. Принимается, что:

$$M_a = p_{Sa} \cdot \delta S_{imta}, \quad (5)$$

где  $M_a$  – эквивалентная амплитуда вибрационного перемещения элемента поверхности по произвольной траектории;

$\delta S_{imta}$  – относительное вибрационное приращение площади изображения круглого фрагмента;

$p_{Sa}$  – коэффициент отображения множества значений  $\delta S_{imta}$  во множество значений  $M_a$ .

Эквивалентная амплитуда вибрационного перемещения элемента поверхности по произвольной траектории  $M_a$  принимается в качестве критерия интенсивности вибрационного процесса:

$$\delta S_{imta} = \frac{S_{imta} - S_{imt0}}{S_{imt0}}, \quad (6)$$

где  $S_{imta}$  – площадь изображения круглого фрагмента при вибрационном перемещении его оригинала по произвольной траектории;

$S_{imt0}$  – площадь изображения круглого фрагмента при неработающем испытываемом источнике вибрации.

Интенсивность вибрации сложной траектории измеряется амплитудой такого эквивалентного гармонического вибрационного перемещения в плоскости объекта по оси абсцисс, которое обуславливает вибрационное приращение площади изображения тестового фрагмента круглой формы  $\delta S_{imtx}$ , равное вибрационному приращению площади изображения тестового фрагмента круглой формы  $\delta S_{imta}$ .

Таким образом, радиус тестового фрагмента круглой формы рекомендуется выбирать минимальным при условии превышения им максимальной ожидаемой эквивалентной амплитуды контролируемого вибрационного перемещения по произвольной траектории.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье обосновывается актуальность темы дистанционного вибрационного контроля состояния техногенных и природных объектов на основе анализа размытия изображений. Проведена примерная реконструкция изображения фрагмента круглой формы с вибрационным размытием при прямолинейном гармоническом вибрационном перемещении его оригинала в плоскости объекта регистрирующего устройства. Составлена примерная схема измерения интенсивности вибрации на основе анализа размытия изображения круглой формы. В статье поставлена задача сформулировать критерий интенсивности вибрационных процессов сложной траектории, на основе которого возможна выработка обоснованных рекомендаций по выбору радиуса тестового фрагмента круглой формы. В статье изложен принцип оценки погрешности дискретизации при измерении амплитуды прямолинейного гармонического вибрационного перемещения исследуемого элемента поверхности в плоскости объекта. Проведено разбиение изображения на характерные сегменты. Представлено семейство кривых, выражающих приведенную погрешность измерения вибрационного перемещения как функцию самой этой величины, нормированной на радиус тестового фрагмента при различных значениях площади изображения тестового фрагмента без вибрационного размытия. Сформулировано понятие эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения по произвольной траектории. Выработаны рекомендации по выбору радиуса тестового фрагмента круглой формы.

## Список источников

1. Юрков, Н. К. Оперативное управление компрессорными станциями для изменения прокачки газа в газопроводе / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 2 (54). – С. 99–105.
2. Юрков, Н. К. Оперативное управление компрессорными станциями для изменения прокачки газа в газопроводе / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Д. Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4 (32). – С. 220–231.
3. Мельничук, А. И. К проблеме синтеза многопозиционной радиолокационной станции обнаружения беспилотных летательных аппаратов / А. И. Мельничук, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2022. – № 3 (39). – С. 33–41. – DOI: 10.21685/2307-4205-2022-3-4.
4. Кошелев, Н. Д. Управление искусственных нейронных сетей распознавания раскладовки образов высокого разрешения / Н. Д. Кошелев, Али Алхатем, К. С. Новиков, А. Д. Цуприк, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2022. – № 2 (38). – С. 85–91. – DOI: 10.21685/2307-4205-2022-2-10.
5. Калашников, В. С. Формирование управляющего сигнала адаптивной информационно-измерительной и управляющей системы вибрационных испытаний / В. С. Калашников, А. В. Лысенко, Г. В., Таньков, В. А. Трусов, Н. С. Реута // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 90–97. – DOI: 10.21685/2307-4205-2020-4-10.
6. Патент 2726270 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков. – Оpubл. 10.07.2020 ; бюл. № 19.
7. Патент 2765336 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, Н. С. Реута. – Оpubл. 28.01.2022 ; бюл. № 4.
8. Патент 2798740 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, Н. С. Реута. – Оpubл. 26.06.2023 ; бюл. № 18.
9. Григорьев, А. В. Восстановление геометрических параметров следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, А. В. Лысенко, Н. В. Горячев // Надежность и качество : труды международного симпозиума. – 2021. – Т. 2. – С. 32–35.
10. Григорьев, А. В. Поиск периферийных точек главного линейного сечения следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. К. Гришко, Е. А. Данилова, С. А. Бростилов, И. М. Рыбаков // Надежность и качество : труды международного симпозиума. – 2021. – Т. 2. – С. 35–38.
11. Григорьев, А. В. Способ контроля технического состояния движущихся механизмов на основе статистического анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, Н. С. Реута, Э. В. Лапшин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 55–63. – DOI: 10.21685/2307-4205-2020-3-7.
12. Grigoryev, A. V. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring mechanisms / A. V. Grigoryev, I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, N. V. Goryachev, N. S. Reuta // Procedia Computer Science. – 2021. – P. 736–742
13. Нуржанов, Д. Х. Анализ размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки / Д. Х. Нуржанов, А. В. Григорьев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, Н. А. Стрельцов // Надежность и качество : труды международного симпозиума. – 2017. – Т. 2. – С. 14–16.
14. Григорьев, А. В. Конъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, Н. С. Реута, Н. В. Горячев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 3 (63). – С. 57–67. – DOI: 10.21685/2072-3059-2022-3-6.

## References

1. Yurkov, N. K., Shtykov, R. A. Operational control of compressor stations to change gas flow in the gas pipeline. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2021, no. 2, pp. 99–105.
2. Yurkov, N. K., Kochegarov, I. I., Petryanin, D. L. On the problem of modeling the risk of failure of long-term electronic equipment. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2015, no. 4, pp. 220–231.

3. Melnichuk, A. I., Goryachev, N. V., Yurkov, N. K. On the problem of synthesis of a multi-position radar station for detecting unmanned aerial vehicles. *Reliability and Quality of Complex Systems*, 2022, no. 3, pp. 33–41. DOI: 10.21685/2307-4205-2022-3-4.

4. Koshelev, N. D., Alkhatem, Ali, Novikov, K. S., Tsuprik, A. D., Yurkov, N. K. Control of artificial neural networks for high-resolution image recognition storyboards. *Reliability and Quality of Complex Systems*, 2022, no. 2, pp. 85–91. DOI: 10.21685/2307-4205-2022-2-10.

5. Kalashnikov, V. S., Lysenko, A. V., Tankov, G. V., Trusov, V. A., Reuta, N. S. Formation of a control signal for an adaptive information-measuring and control system for vibration tests. *Reliability and Quality of Complex Systems*, 2020, no. 4, pp. 90–97. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-4-10.

6. Grigoriev, A. V., Kochegarov, I. I., Yurkov, N. K. *Patent 2726270 Russian Federation. Method for monitoring the technical condition of mechanisms*. Publ. 07.10.2020 ; bul. no. 19.

7. Grigoriev, A. V., Kochegarov, I. I., Yurkov, N. K., Reuta, N. S. *Patent 2765336 Russian Federation. Method for monitoring the technical condition of mechanisms*. Publ. 01.28.2022 ; bul. no. 4.

8. Grigoriev, A. V., Kochegarov, I. I., Yurkov, N. K., Reuta, N. S. *Patent 2798740 Russian Federation. Method for monitoring the technical condition of mechanisms*. Publ. 06.26.2023 ; bul. no. 18.

9. Grigoryev, A. V., Kochegarov, I. I., Yurkov, N. K., Lysenko, A. V. Goryachev, N. V. Restoring the geometric parameters of the vibration blur trace of a circular mark image. *Reliability and quality : proceedings of the international symposium*, 2021, no. 2, pp. 32–35.

10. Grigoryev, A. V., Grishko, A. K., Danilova, E. A., Brostilov, S. A., Rybakov, I. M. Search for peripheral points of the main linear section of the trace of vibration blurring of the image of a round mark. *Reliability and quality : proceedings of the international symposium*, 2021, no. 2, pp. 35–38.

11. Grigoryev, A. V., Kochegarov, I. I., Yurkov, N. K., Reuta, N. S., Lapshin, E. V. A method for monitoring the technical condition of moving mechanisms based on statistical analysis of vibration blurring of the image of a round test object. *Reliability and Quality of Complex Systems*, 2020, no. 3, pp. 55–63. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-3-7.

12. Grigoryev, A. V., Kochegarov, I. I., Yurkov, N. K., Goryachev, N. V., Reuta, N. S. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring mechanisms. *Procedia Computer Science*, 2021, pp. 736–742.

13. Nurzhanov, D. Kh., Grigoryev, A. V., Trusov, V. A., Bannov, V. Ya., Streltsov, N. A. Analysis of blurring of the image of a round mark during reciprocating vibrational movement of the studied material point. *Reliability and quality : proceedings of the international symposium*, 2017, no. 2, pp. 14–16. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-3-7.

14. Grigoryev, A. V., Kochegarov, I. I., Yurkov, N. K., Reuta, N. S., Goryachev, N. V. Conjunctive model of the control object state invariant. *News of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Science*, 2022, no. 3, pp. 57–67. DOI: 10.21685/2072-3059-2022-3-6.

Статья поступила в редакцию 16.10.2023; одобрена после рецензирования 01.12.2023; принята к публикации 04.12.2023.

The article was submitted 16.10.2023; approved after reviewing 01.12.2023; accepted for publication 04.12.2023.

## **ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ)**

УДК 62:389: 398.14: 53.08

### **СРАВНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ АЛГОРИТМОВ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ: ОБЗОР МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДИСКРЕТНОГО СИГНАЛА**

*Львова Елена Викторовна*, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, аспирант, ORCID: 0000-0002-6959-6397, e-mail: evhalay@mail.ru

*Никифоров Александр Анатольевич*, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0009-0004-9195-1537, e-mail: director@mail.ru

*Балабан Олег Михайлович*, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7735-7946, e-mail: ombal@mail.ru

*Шаронов Максим Александрович*, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, аспирант, ORCID: 0009-0002-5291-7980, e-mail: max.sharonov.97@mail.ru

В статье представлен обзор алгоритмов оценки активной мощности в однофазной цепи электроснабжения с использованием цифровой обработки сигналов во временной и частотной областях. Также проведено сравнение свойств этих алгоритмов для синусоидального тестового сигнала. Сравняются не только уже известные алгоритмы, но и предлагаемый новый алгоритм. Дается дополнительная информация о некоторых известных алгоритмах. Приведены результаты компьютерного моделирования в среде MATLAB и результаты измерений, полученные с помощью мультиплексированных компьютерных плат сбора данных. Также исследованы косинусные окна сглаживания в сочетании с предлагаемым итеративным алгоритмом. Помимо этого, исследуется влияние аддитивного шума и субгармоник на точность оценки активной мощности. Показано, что наиболее точные результаты оценивания обеспечивает метод во временной области, основанный на методе максимального правдоподобия.

**Ключевые слова:** оценка мощности, цифровая обработка сигнала, некогерентная дискретизация, сглаживающие окна, относительная погрешность, оценивание во временной и частотной областях

### **COMPARISON OF DIGITAL ALGORITHMS FOR ACTIVE POWER MEASURING: A REVIEW OF DISCRETE SIGNAL PROCESSING METHODS**

*Lvova Elena V.*, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., 77 Politeknicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, graduate student, ORCID: 0000-0002-6959-6397, e-mail: evhalay@mail.ru

*Nikiforov Alexander A.*, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., 77 Politeknicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0009-0004-9195-1537, e-mail: director@mail.ru

*Balaban Oleg M.*, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., 77 Politeknicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0000-0001-7735-7946, e-mail: ombal@mail.ru

*Sharonov Maxim A.*, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., 77 Politeknicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, graduate student, ORCID: 0009-0002-5291-7980, e-mail: max.sharonov.97@mail.ru

This article discusses algorithms for digital processing of current and voltage signals in a single-phase power supply circuit, the purpose of which is to measure the circuit active power. A review of signal processing algorithms in the time and frequency domains is presented. The comparative performance of the presented algorithms for harmonic signals is investigated. In addition, all the studied algorithms are compared with the algorithm previously proposed by the authors. The computer simulation results obtained using the MATLAB media and the results of measurements carried out by a computer multiplexed plug-in data acquisition board are presented. Finally, the use of modern iterative algorithm for new cosine windows is considered, and the effect of additive noise as well as subharmonics on the signal under test is estimated.

**Keywords:** power estimation, digital signal processing, incoherent sampling, smoothing windows, relative error, time and frequency domain estimation

## ВВЕДЕНИЕ

В данном исследовании мы рассматриваем значимость измерения мощности и оценки качества электроэнергии. Многочисленные исследования посвящены различным аспектам измерения мощности. В нашей статье представлен обзор и сравнение алгоритмов расчета активной мощности однофазной цепи с использованием цифровой обработки сигналов (ЦОС). Мы предлагаем новый алгоритм, который учитывает влияние преобразователей напряжения и тока на точность расчета мощности. Алгоритмы анализируют некогерентную дискретизацию сигналов и используют различные методы, такие как дискретно-временное преобразование Фурье (ДВПФ), дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и быстрое преобразование Фурье (БПФ), для перехода от временной области к частотной области и получения более точных оценок мощности. Мы также анализируем ошибку оценки мощности, вызванную различными факторами, такими как фаза нагрузки, постоянные составляющие напряжения и тока, отношение сигнал/шум (ОСШ), количество дискретных отсчетов на одном периоде сигнала, используемое сглаживающее окно и некогерентность дискретизации. В статье также приводится информация о ранее предложенных алгоритмах другими исследователями, чтобы сравнить эффективность нашего нового алгоритма с уже существующими методами. Наше исследование поможет улучшить точность измерения мощности и оценки качества электроэнергии для эффективного использования электрической энергии.

## ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Оценка активной мощности рассчитывается как среднее значение мгновенной мощности за промежутки времени [6, 9]:

$$\tilde{P} = \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} v(t)i(t)dt \approx \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v(n)i(n), \quad (1)$$

где  $\tilde{P}$  – значение оценки активной мощности;

$T_M$  – время измерения (при классическом теоретическом определении понятия активной мощности выбирается один период сигнала для расчета);

$v(n)$  и  $i(n)$  – значения мгновенных напряжения  $v(t)$  и тока  $i(t)$  в моменты взятия отсчетов;

$N$  – число отсчетов в выборках (для простоты оно выбрано одинаковым для сигналов тока и напряжения).

Также среднее значение (1) можно получить в частотной области как постоянную составляющую ДПФ сигнала мгновенной мощности. Общее время измерения  $T_M = NT_S$  (где  $T_S$  – период дискретизации, интервал времени между соседними отсчетами) также можно представить как  $T_M = (M+\lambda)T_{Sig}$ , где  $M$  – целое число полных периодов сигнала  $T_{Sig}$ , полностью попавших в выборку производимых отсчетов, а  $\lambda$  – часть последнего измеренного периода, выраженная десятичной дробью ( $0 \leq \lambda \leq 1$ ). Усредненное  $\tilde{P} = P$ , если  $\lambda = 0$  (когерентная выборка), и  $\tilde{P} \neq P$  для  $\lambda \neq 0$  [15, 16]. Поскольку точная когерентная выборка, как правило, невозможна, разница между  $\tilde{P}$  и  $P$  (или относительная погрешность измеряемой активной мощности  $P$ , вызванная некогерентностью выборки) должна учитываться. Эту погрешность можно существенно уменьшить за счет использования удачно подобранного сглаживающего окна (весовой функции) и дополнительной обработки сигнала. Как известно, относительная погрешность оценки  $\tilde{P}$  определяется как:

$$\delta_P = (\tilde{P} - P)/P. \quad (2)$$

Следует отметить, что период мгновенной мощности составляет половину периода напряжения и тока. Дополнительная погрешность может возникать вследствие одновременного проведения соответствующих отсчетов входных сигналов напряжения и тока при использовании недорогих мультиплексных плат сбора данных. Эта погрешность может быть уменьшена с помощью различных интерполяций сигналов тока и напряжения. Эффективность линейной интерполяции рассмотрена в [8, 17]. Сравнение эффективности линейной интерполяции и сплайн-интерполяции [17, 18] с обработкой сигналов без какой-либо интерполяции дано на рисунке 1, где показаны результаты компьютерного моделирования, и на рисунке 2, где приведены результаты обработки реальных экспериментальных данных. Измерения производились с помощью недорогой МПСД PCI 6023E (*National Instruments*, США). В обоих случаях для проведения линейной интерполяции данных использовалась сглаживающая оконная функция Ханна [19]. Кривые синхронной дискретизации (когда соответствующие отсчеты значений напряжения и тока производятся в одно и то же время) и сплайновой интерполяции практически совпадают, когда на одном периоде сигнала делается  $N_T = 100$  отсчетов (где  $N_T$  – число отсчетов на одном периоде сигнала), что видно из правого графика на рисунке 1.

При обработке экспериментальных данных, полученных с помощью МПСД PCI 6023E (рис. 2), которая не обеспечивает синхронной дискретизации сигналов тока и напряжения по времени, аналогичного результата, когда кривые линейной и сплайновой интерполяции практически совпадают, можно добиться при числе отсчетов на одном периоде  $N_T = 2000$ , что видно из правого графика рисунка 2.

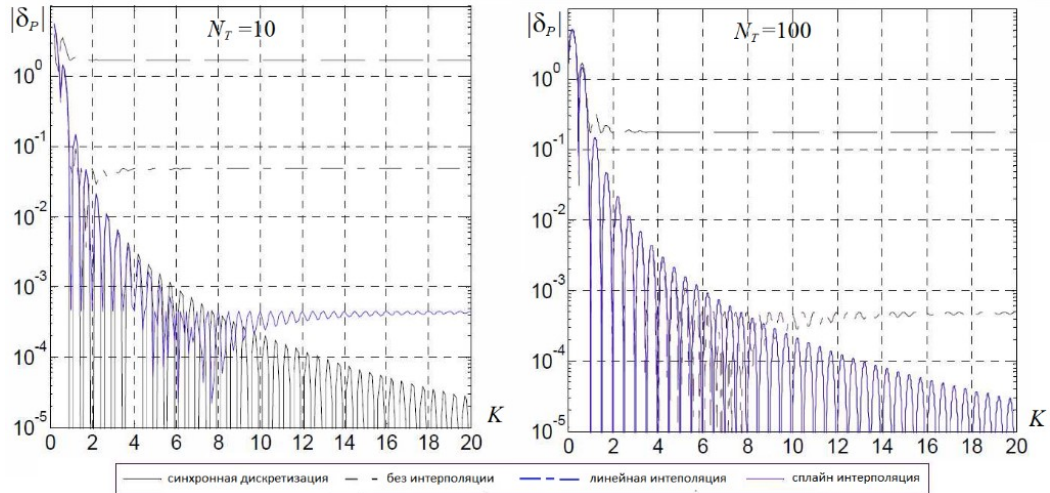


Рисунок 1 – Модельные зависимости относительной погрешности  $\delta$  из-за несинхронной дискретизации от числа периодов наблюдения сигналов  $K$  для  $N_T = 10$  (левый) и 100 (правый)

Вариант несинхронной дискретизации сигналов в каналах тока и напряжения возможно устранить, применяя МПСД с одновременным преобразованием каналов для каждого канала посредством аналого-цифрового преобразователя на каждом канале либо используя синхронизированные высокоточные цифровые вольтметры, как это описано выше [15]. Далее будет описан способ обработки экспериментальных данных, основанный на методе максимального правдоподобия (ММП), который позволяет существенно снизить погрешности оценивания даже с использованием недорогих плат сбора данных типа PCI 6023E.

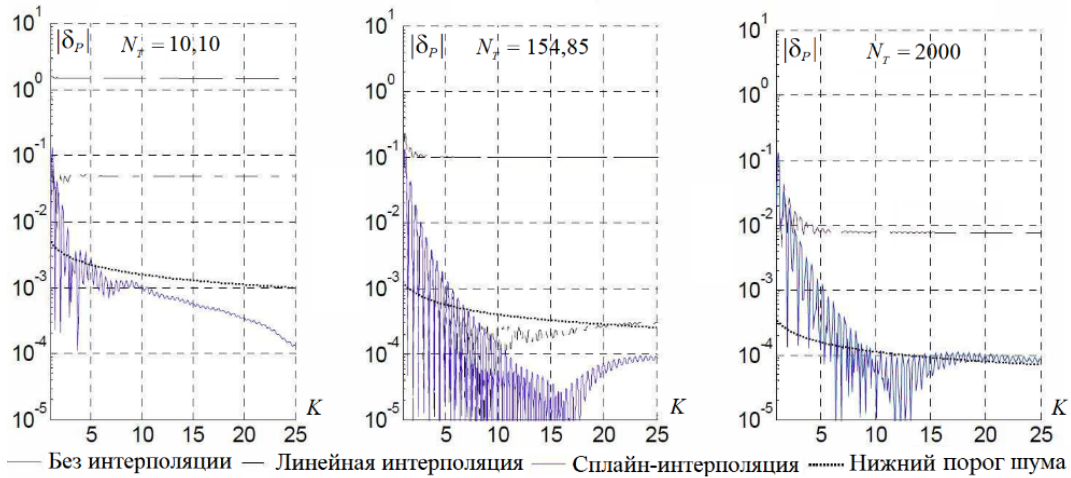


Рисунок 2 – Экспериментальные зависимости относительной погрешности  $\delta$  из-за несинхронной дискретизации от числа периодов наблюдения сигналов  $K$

### **Оценивание мощности во временной области с использованием оконного сглаживания (ВООС)**

Для улучшения точности оценки мгновенной мощности этот алгоритм применяет оконное сглаживание значений. Процесс обработки сигнала осуществляется во временной области без использования ДПФ. Более подробную информацию о таких алгоритмах можно найти в статьях [16, 20]. Оконное сглаживание значительно снижает относительную погрешность оценки активной мощности, особенно при увеличении общего времени оцифровки сигналов. Однако эффективность подавления погрешности зависит от типа окна, используемого для сглаживания. Кроме того, правильный выбор подходящего окна позволяет оценивать мощность с минимальными относительными ошибками, даже при коротких временных интервалах измерений. В данном методе оконное сглаживание применяется к значениям мгновенной мощности. Это может исказить итоговую оценку активной мощности, поэтому полученное значение мощности должно быть скорректировано путем умножения на соответствующий коэффициент, в зависимости от типа окна, используемого при сглаживании. Главные преимущества этого метода – быстрота обработки и простота вычислений.

**Оценивание мощности с использованием интерполяции и повторной дискретизации во временной области (ИПДВО)**

Эффективная оценка мощности сигналов может быть осуществлена с помощью метода интерполяции и повторной дискретизации во временной области (ИПДВО), который был описан в работах [14–16]. Использование этого метода позволяет снизить эффект некогерентной дискретизации сигналов путем интерполяции последовательности отсчетов сигнала и последующей повторной дискретизации интерполированного сигнала, сокращая требуемое время обработки.

Для интерполяции исходных отсчетов сигнала можно применить различные методы, такие как интерполяция алгоритмом «подъема по лестнице», линейная и сплайн-интерполяции [17, 18]. Кроме того, вместо повторной дискретизации интерполированного сигнала можно также усекать исходную последовательность выборок до длины, близкой к целому числу исходных периодов аналогового сигнала. В этом случае для обработки сигнала могут быть применены алгоритмы БПФ, не требующие наличия  $2N$  отсчетов сигнала [16]. Однако такой подход может повлечь возникновение некогерентности дискретизации и смещения оценки мощности.

Для успешного применения метода ИПДВО важно точно знать длительность периода сигнала. Ошибки в вычислении длительности периода или частоты сигнала приводят к остаточной некогерентности дискретизации, что, в свою очередь, может вызвать смещение и относительные ошибки в оценке мощности. Для уменьшения таких ошибок можно применять оконное сглаживание и увеличивать время измерения сигнала.

Метод ИПДВО обеспечивает высокоточную оценку активной мощности сигналов, однако он чувствителен к наличию субгармоник или интергармоник в многочастотных сигналах. Существуют работы, посвященные проблеме их устранения [24–27].

**Оценивание мощности в частотной области с использованием оконного сглаживания (ЧООС)**

Обработка сигнала в частотной области производится после оценки его частотного спектра с помощью соответствующего ДПФ. Поскольку активная мощность представляет собой постоянную составляющую мгновенной мощности, ее можно найти либо как среднее значение мгновенной мощности путем интегрирования во временной области (1), либо как постоянную составляющую нормализованного спектра ДПФ мгновенной мощности. Нормализация спектра в ДПФ заключается в его делении на  $N$  (рассматривается двухсторонний спектр), где  $N$  – число отсчетов последовательности, участвующей в ДПФ. Если отобрано не целое число периодов сигнала, растекание спектра в соседние частотные отсчеты вызывает появление смещения оценки мощности. Эффект некогерентной дискретизации может быть существенно уменьшен путем оконного сглаживания значений мгновенной мощности, как в методе ВООС, либо с использованием обработки дискретных отсчетов по ММП. Нормализованная постоянная составляющая ДПФ от мгновенной мощности, сглаженной оконной функцией, должна быть скорректирована умножением на тот же коэффициент, что и значения мгновенной мощности в методе ВООС.

Поскольку методы ЧООС и ВООС отличаются только способом нахождения постоянной составляющей мгновенной мощности, алгоритмы оценивания активной мощности этими двумя методами практически идентичны.

**Оценивание мощности в частотной области с использованием оконного сглаживания и интерполяции (ЧООСИ)**

В этом алгоритме для повышения точности оценивания активной мощности информация обо всех составляющих сглаженного оконной функцией мгновенного спектра мощности доступна пользователю. На практике для оценивания активной мощности используется несколько частотных отсчетов полученного с помощью ДПФ мгновенного спектра мощности в окрестности постоянной составляющей. Если известен спектр оконной функции и сглаженные этой оконной функцией спектры сигнала получены с помощью ДВПФ и ДПФ, то можно найти частотные составляющие спектра самого исследуемого сигнала в окрестности локальных максимумов спектра ДПФ, применяя различные интерполяционные методы (например, [28, 29]). При оценивании активной мощности необходимо найти постоянную составляющую мгновенного спектра мощности. В этом случае можно использовать упрощенные интерполяционные выражения [15]. Если применяется следующая косинусная сглаживающая функция  $w(n)$  порядка  $L$ , которая использует  $N$  отсчетов:

$$w(n) = \sum_{r=0}^L D_r \cos\left(2\pi r \frac{n}{N}\right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3)$$

то общая интерполяционная формула для оценивания активной мощности может быть записана как:

$$\tilde{P} = \frac{|X(0)| \cdot |D_0| + |X(1)| \cdot |D_1| + |X(2)| \cdot |D_2| + \dots}{D_0^2 + D_1^2 / 2 + D_2^2 / 2 + \dots}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{X} = [X(0), \dots, X(m-1)]$  – вектор-строка, состоящая из отсчетов сглаженного оконной функцией двустороннего амплитудного ДПФ спектра мгновенной мощности, соответствующих положительных частотам, начиная с постоянной составляющей  $X(0)$ ;

$D_i$  – коэффициенты оконной функции из (3);

$$m = \lceil N/2 \rceil.$$

Соотношение (4) можно переписать в матричной форме:

$$\tilde{P} = \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Q}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{Q}$  – вектор-строка коэффициентов интерполяции;

$^T$  – оператор транспонирования матрицы.

Длина векторов  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{Q}$  обычно меньше или равна числу отсчетов мгновенного спектра мощности, соответствующих неотрицательным частотам, в главном лепестке спектра используемой оконной функции, центрированной на нулевой частоте. Вектор  $\mathbf{Q}$  может быть выражен в следующем виде:

$$\mathbf{Q} = \frac{[|D_0|, |D_1|, |D_2|, \dots, |D_{m-1}|]}{D_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m-1} D_i^2}. \quad (6)$$

Значения коэффициентов интерполяции, найденные из (6), соответствуют значениям, представленным в [15], для окон, порядок которых не превышает  $L = 3$ . Коэффициенты интерполяции для окон Райфа – Винсента первого типа, порядок которых меняется от 0 по 4, приведены в [30, 31].

Метод ЧООС соответствует одноточечному частному случаю метода ЧООСИ. Последний повышает точность оценивания мощности за счет оконного сглаживания и интерполяции в частотной области. Хотя его вычислительная сложность выше, чем у методов во временной области, но благодаря эффективным алгоритмам БПФ и использованию современной электроники время вычислений увеличится незначительно. Сравнительный анализ различных алгоритмов оценки мощности дан в [32, 33].

#### **Оценивание мощности в частотной области с использованием оценивания отдельных частотных составляющих мощности (ОЧОИК)**

В качестве альтернативы активную мощность можно найти в частотной области путем суммирования активных мощностей отдельных частотных составляющих спектра мощности. Эти компоненты активной мощности представляют собой величины гармонических составляющих вплоть до  $M$ -го порядка, включая постоянную составляющую [9]:

$$\tilde{P} = I_0 V_0 + \sum_{k=1}^M \frac{\tilde{V}_k \tilde{I}_k}{2} \cos(\tilde{\varphi}_k), \quad (7)$$

где  $M$  – число учитываемых гармонических составляющих сигнала;

$\tilde{V}_k$  и  $\tilde{I}_k$  – оценки действующих напряжения и тока;

$\tilde{\varphi}_k$  – оценки фазовых сдвигов между током и напряжением у гармонических составляющих соответствующего порядка в момент начала дискретизации.

Оконное сглаживание здесь применяется к сигналам напряжения и тока, а интерполяция ДПФ используется для оценивания частоты и, следовательно, действующих значений и фаз отдельных гармонических составляющих сигналов напряжения и тока.

Нахождение активной мощности этим методом довольно трудоемкая и длительная процедура. Здесь относительная погрешность оценки мощности зависит от относительной погрешности оценки активной мощности на наибольшей из всех рассматриваемых гармонических составляющих сигналов. Однако этот метод расчета активной мощности предоставляет информацию о частотной структуре оцениваемой мощности и возможность выбора полосы частот, в которой должна вычисляться активная мощность.

#### **Оценивание мощности в частотной области с использованием оконного сглаживания и итерационного расчета спектра мгновенной мощности (ЧООСИР)**

Этот недавно предложенный метод в некоторых случаях может повысить точность оценивания активной мощности за счет обработки сигналов в частотной области. Принцип заключается в следующем. Комплексный спектр ДВПФ с дискретным временем, нормализованный с помощью косинусного окна (3), равен:

$$W(\theta) = \frac{e^{-j\left(\pi\theta\frac{N-1}{N}\right)}}{N} \sum_{r=0}^L \frac{D_r}{2} \left( e^{j\pi r\frac{N-1}{N}} \frac{\sin[\pi(\theta-r)]}{\sin\left(\frac{\pi(\theta-r)}{N}\right)} + e^{-j\pi r\frac{N-1}{N}} \frac{\sin[\pi(\theta+r)]}{\sin\left(\frac{\pi(\theta+r)}{N}\right)} \right), \quad (8)$$

где  $r$  – порядковый номер частотного отсчета;

$\theta$  – частота внутри элемента разрешения по частоте ( $\theta$  – нецелое действительное число);

$N$  – число отсчетов в окне.

После умножения на корректирующий коэффициент только растекание спектра, вызванное ограниченностью интервала дискретизации сигналов (*long-range leakage*), влияет на относительные погрешности оценки постоянной составляющей и других составляющих спектра мгновенной мощности. Растекание за счет ограниченности интервала наблюдения [34] вызвано взаимным влиянием спектральных компонент из-за отсутствия синхронизма между временем наблюдения сигнала (1) и периодом синусоидальных составляющих в сигнале. Когда синхронная выборка невозможна, используют сглаживающие окна для уменьшения величины разрыва сигнала на концах отрезка периодического расширения  $T_M$ , где сигнал обрезается.

Это растекание может быть уменьшено за счет применения соответствующего численного метода, заключающегося в итерационном оценивании компонентов спектра и вычитании на каждом шаге наибольшей составляющей спектра из спектра мгновенной мощности. Наибольшие значения частоты, амплитуды и фазы могут быть найдены с использованием метода ЧООСИ (подраздел 1.4). Далее их надо вычесть из спектра мгновенной мощности (вычитаются две зеркальные составляющие положительной и отрицательной частоты со всеми их вкладами в соседние спектральные компоненты). Благодаря этой операции точность расчета остальных компонентов в некоторых случаях возрастает.

Начинать надо с самой большой по амплитуде частотной составляющей на данной итерации (если это будет постоянная составляющая, ее надо перед вычитанием сохранить). Если на последующих шагах еще появятся максимальные постоянные составляющие, то их надо накапливать. Повторяя эту процедуру шаг за шагом, можно добиться повышения точности оценки оставшихся мгновенных составляющих спектра мощности. Последней оценкой всегда должна быть оценка постоянной составляющей.

Естественно, что описанный итерационный алгоритм с вычитанием наибольшей частотной составляющей может оказаться вычислительно сложным. Наиболее трудоемкой частью оставшейся обработки сигнала является повторное вычисление спектра окна, но, если используется окно низкого порядка (например, окно Ханна), это вычисление заметно упрощается.

Этот метод позволяет добиться малой относительной погрешности оценки активной мощности даже при наличии субгармоник и интергармоник в сигнале. Однако эксперименты показали, что этот принцип неэффективен, если в спектре мгновенной мощности имеются большие аддитивные шумы и/или сильные гармонические составляющие.

#### **Оценивание мощности во временной области с использованием метода максимального правдоподобия (ВОММП)**

В приложениях электротехники и электроснабжения возникает задача оценки параметров активной, реактивной и полной мощности сигналов электроснабжения, подаваемых конкретным потребителям. Для этого необходимо оценивать параметры сигналов тока и напряжения (амплитуду, фазу, постоянную составляющую и т. д.). Специфика задачи заключается в том, что данные сигналы имеют одинаковую частоту, которая, как правило, может отличаться от основной гармоники  $f_0 = 50$  Гц на некоторую малую величину. Для решения этой задачи был разработан алгоритм, аналогичный алгоритмам, из действующего стандарта [35]. Он был назван «подгонкой синусоиды по семи параметрам» [36] и «основан на исследовании экспериментальных отсчетов, проводимых в каналах напряжения и тока в предположении, что частоты обоих гармонических сигналов одинаковы» [32]. В отечественной литературе представлена улучшенная версия этого алгоритма, основанная на предположении, «что частота сигналов тока и напряжения приблизительно известна ( $f_0 = 50$  Гц)» [9, 32, 37–39]. Это позволило значительно упростить и ускорить расчеты параметров мощностей с использованием ЦОС.

Предложенный алгоритм позволяет оценить амплитуды  $A_i$  и фазы  $\varphi_i$  синусоид напряжения и тока, которые описываются следующей моделью:

$$u_i(t) = A_i \cos(2\pi f t + \varphi_i) + C_i = D_i \cos(2\pi f t) + B_i \sin(2\pi f t) + C_i, \quad (9)$$

где  $i$  – обозначение каналов тока и напряжения ( $i = 1, 2$ );

$D_i$  и  $B_i$  – синфазная и квадратурная составляющие синусоид соответственно.

Кроме того, алгоритм позволяет получать оценки постоянных смещений  $C_i$  и частоту  $f$ , если она отлична от  $f_0 = 50$  Гц и неизвестна, что может быть вызвано малыми колебаниями частоты  $f$  сетевых синусоидальных сигналов и/или неточным знанием частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя на МПСД.

Предполагается, что частота сигналов тока и напряжения известна с некоторой малой погрешностью  $\nu$  ( $f = f_0 + \nu$ ), что существенно упрощает предлагаемый алгоритм. Тогда модель (9) представляется в виде [32, 37–39]:

$$u_{ij} = u(t_{ij}) = A_j \sin[2\pi(f_0 + \nu)t_{ij} + \varphi_j] + C_i + \xi_{ij}; \quad (i = 1, 2; \quad j = 1, \dots, N), \quad (10)$$

где  $\xi_{ij}$  – погрешности измерения значений сигналов в каналах, которые предполагаются распределенными нормально с нулевым средним и неизвестной дисперсией  $\sigma^2$ . Константы  $C_i$  считаются неизвестными, но сохраняющими постоянные значения в одном цикле измерений (пока в каждом канале производится по  $N$  отсчетов сигнала). Помимо этого считается, что  $|\nu(t)| \ll f_0$ .

Система нелинейных уравнений (10) решается по ММП относительно семи неизвестных параметров  $A_1, \varphi_1, C_1, A_2, \varphi_2, C_2$  и  $\nu$ . Отсюда берется название алгоритма – «подгонка синусоид по семи параметрам» [32]. Ход решения изложен в [37–39]. На первом этапе система (10) путем замены переменных сводится к линейной, причем новые искомые параметры должны удовлетворять набору квадратичных ограничений. Решение получается методом множителей Лагранжа и использованием быстро сходящейся итерационной процедуры [9, 39–43].

Главным достоинством метода является то, что оценка поправки частоты  $\nu$  формируется на той же итерации, что и ММП оценки остальных шести параметров, а не используется ее значение, вычисленное по данным, полученным на предыдущей итерации. Поэтому предлагаемый алгоритм сходится к решению гораздо быстрее (за две-три итерации), а точность оценивания получается более высокой [40–43].

В работах [9, 32] проведен сравнительный анализ предлагаемого двухканального алгоритма с другими известными двухканальными методами.

Алгоритмы «синусоидальной подгонки по семи параметрам» хорошо подходят для использования именно в электротехнических приложениях для оценки параметров синусоидальных сигналов тока и напряжения в сети. Получающиеся с его помощью оценки практически совпадают с нижней границей Крамера-Рао [32, 42, 43]. Авторы работы [32, 37, 38] на основании теоретических выводов дают заключение о перспективности этого алгоритма оценивания, поскольку он дает более точные результаты и не уступает в быстродействии своим конкурентам.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ И НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В разделе представлены результаты компьютерного моделирования, проводимых в среде MATLAB, и экспериментального исследования реальных сигналов тока и напряжения, отсчеты которых получены с помощью встраиваемых МПСД с использованием описанных выше алгоритмов. В конце также приводятся некоторые примеры использования косинусных сглаживающих окон и предложенного нового итерационного алгоритма [32, 37–39].

На рисунке 3 и 4 сравниваются зависимости относительных погрешностей оценки мощности  $\delta_p$  с помощью исследуемых методов ее расчета от числа периодов измерения  $K$  при двух различных входных сигналах.

На рисунке 3 приведены зависимости для компьютерных моделей простейшего входного сигнала. Использовались синусоидальные сигналы напряжения и тока без постоянной составляющей и без шума. Фаза полного сопротивления нагрузки составляет  $80^\circ$ . Во всех алгоритмах обработки, кроме ВОММП, использовались окно Ханна и трехточечная интерполяция. Как следует из рисунка 3, метод ВОММП является самым точным, но в условиях отсутствия шума и субгармоник метод расчета мощности ИПДВО (с использованием повторной дискретизации для уменьшения растекания спектра) практически не уступает ВОММП по точности. Третий по точности способ расчета спектра мгновенной мощности – ЧООСИР, использующий повторную коррекцию спектра мгновенной мощности. Метод расчет ЧООСИ является четвертым в этом ряду, опять-таки использующим трехточечную интерполяцию окна Ханна в частотной области.

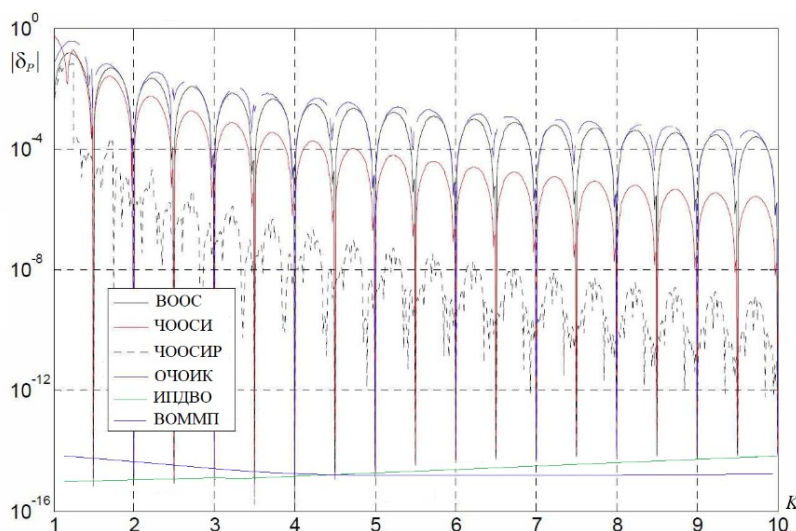


Рисунок 3 – Модельные зависимости относительной погрешности  $\delta$  исследуемых алгоритмов от числа периодов наблюдения сигналов  $K$  для чисто синусоидальных сигналов тока и напряжения без помеховых сигналов и постоянной составляющей

На рисунке 4 показаны те же зависимости, только теперь входные сигналы имеют более сложные модели. К гармоническому сигналу основной частоты  $f_0 = 50$  Гц добавлена одна субгармоника (с отношением частот  $f_{sub}/f_0 = 0,63$  и отношением амплитуд  $A_{sub}/A_0 = 0,5$ ). Все остальные параметры остались прежними. Точно также используется 3-точечная интерполяция окна Ханна (за исключением методов ИПДВО и ВОММП), а также метод расчета мощности с использованием интерполяции и повторной дискретизации во временной области с окном.

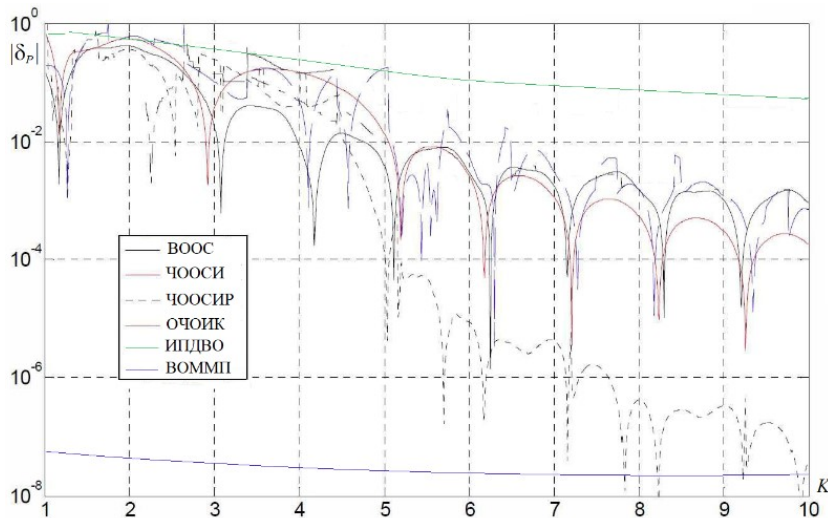


Рисунок 4 – Модельные зависимости относительной погрешности  $\delta$  исследуемых алгоритмов от числа периодов наблюдения сигналов  $K$

Для сигналов тока и напряжения, содержащих субгармонику, кроме сигналов основной частоты, на рисунках 3 и 4 показывают, что присутствие в сигналах субгармонической составляющей значительной амплитуды увеличивает погрешность для всех методов оценивания мощности.

При этом паразитное влияние субгармоники на метод ИПДВО проявляется в максимальной степени: при ее отсутствии ИПДВО – один из лучших по точности оценивания (рис. 3), но при наличии субгармоники точность ИПДВО становится наихудшей по сравнению с исследуемыми методами (рис. 4). Тем не менее предлагаемый авторами метод ВОММП дает наилучшую точность оценивания.

Далее проводилось исследование влияния аддитивного нормального шума (с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, задаваемой на основании требуемых ОСШ) на точность оценивания активной мощности. На рисунке 5 показаны полученные в среде MATLAB модельные зависимости относительной погрешности оценивания активной мощности от числа периодов измерения сигналов тока и напряжения для различных ОСШ (без шума, 30 дБ, 50 дБ и 70 дБ). Исследовался метод измерения ВООС с окном сглаживания Ханна. Для сравнения на этом же графике показана зависимость относительной погрешности метода ВОММП для ОСШ = 30 дБ (нижняя кривая). Из рисунка 5 видно, что предлагаемый авторами метод ВОММП дает гораздо более точные оценки мощности даже для самого малого ОСШ.

На рисунке 6 показаны модельные зависимости относительной погрешности оценивания амплитуд сигналов от ОСШ для исследуемых методов. С помощью модели (9) задавались сигналы напряжения и тока (разность фаз  $\varphi_U - \varphi_I = 80^\circ$ ), к которым добавлялся аддитивный нормально распределенный шум, генерируемый средствами MATLAB. Требуемый уровень ОСШ настраивался подбором дисперсии шума. Экспериментальные зависимости строились путем усреднения 1000 модельных опытов оценивания для каждого задаваемого ОСШ. Во всех алгоритмах оценивания, кроме ИПДВО и ВОММП, использовалось сглаживание окном Ханна. Временной отрезок измерения был равен  $T_M = 5,75 \cdot T_{Sig}$ .

Из рисунка 6 видно, что все исследуемые методы оценки активной мощности во временной и частотной областях, основанные на применении различных модификаций ДПФ уступают по точности классическому способу оценивания по ММП, предлагаемому авторами (ВОММП, нижний график). Это связано с тем, что ММП дает оптимальные оценки, близкие по точности к нижней границе Крамера-Рао [42, 43].

На рисунке 7 показаны результаты сравнения модельных сигналов, сгенерированных в среде MATLAB, и реальных экспериментальных данных. Последние получены с помощью двухканального генератора сигналов LW-500W (фирма *Longwei Instruments Co.* Гонконг, КНР) и измерены с помощью МПСД. Использовались недорогие мультиплексные платы PCI 6023E. Частота дискретизации была 50 кГц для каждого канала. Синусоидальные сигналы генерировались с частотой 50 Гц с амплитудой 5 В.

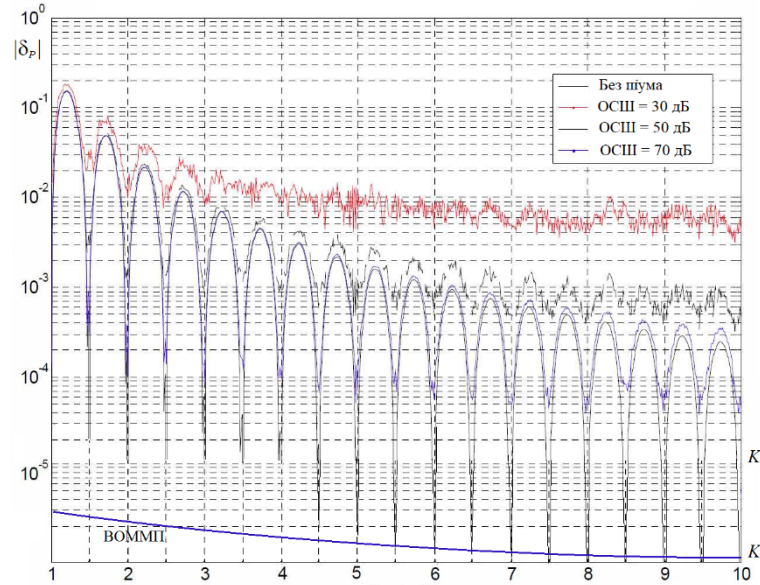


Рисунок 5 – Модельные зависимости относительной погрешности  $\delta$  исследуемых алгоритмов от числа периодов наблюдения сигналов  $K$  при действии аддитивного нормального шума для различных ОСШ

Обработка модельных и реальных экспериментальных данных проводилась двумя способами: алгоритмом ВООС с окном сглаживания Райфа-Винсента третьего порядка [30, 31] и алгоритмом ВОММП. Результаты обработки алгоритмом ВОММП практически не отличаются в масштабе рисунка для модельных и реальных экспериментальных данных.

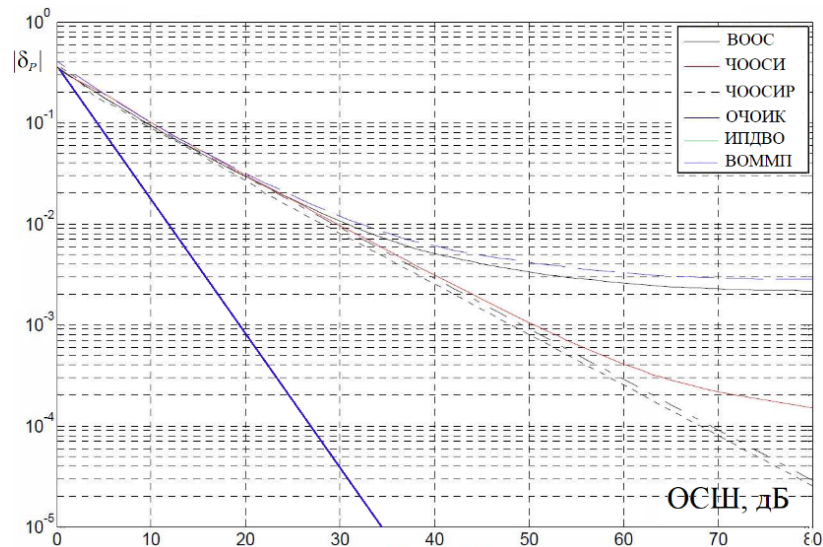


Рисунок 6 – Сравнение точности методов оценивания активной мощности в зависимости от интенсивности аддитивного шума

Для демонстрации минимального влияния выбора вида окон сглаживания на точность оценивания был проведен модельный эксперимент, когда задаваемые моделью (9) сигналы обрабатывались алгоритмом ВООС с использованием различных окон сглаживания. Сравнивались окна Райфа – Винсента и два косинусных окна, описанных в работе [8, 14], которые там названы  $S7$  и  $S8$  (они задаются моделью (3) и отличаются различными коэффициентами  $D_r$  и размером окон  $N$ ). Авторы [14] показывают достоинства косинусных окон по сравнению с окном Райфа – Винсента, основанного на известных классических окнах Дольфа – Чебышева [30, 31]. Порядок всех окон был равен  $L = 4$ . На рисунке 8 показаны зависимости относительной погрешности оценивания в зависимости от числа периодов  $T_{Sig}$  сигнала, в течение которых проводилось измерение отсчетов тока и напряжения. Из этого рисунка видно, что использование «более подходящих» окон сглаживания позволяет достичь некоторого незначительного повышения точности оценивания активной

мощности в сети по сравнению с окном Райфа – Винсента (Р–В на рисунке 8), особенно для малых времен наблюдения сигнала  $T_S \leq 4 \cdot T_{Sig}$ . Однако проигрыш оптимальным методам обработки сигнала все равно остается значительным, даже в отсутствие шумов измерения.

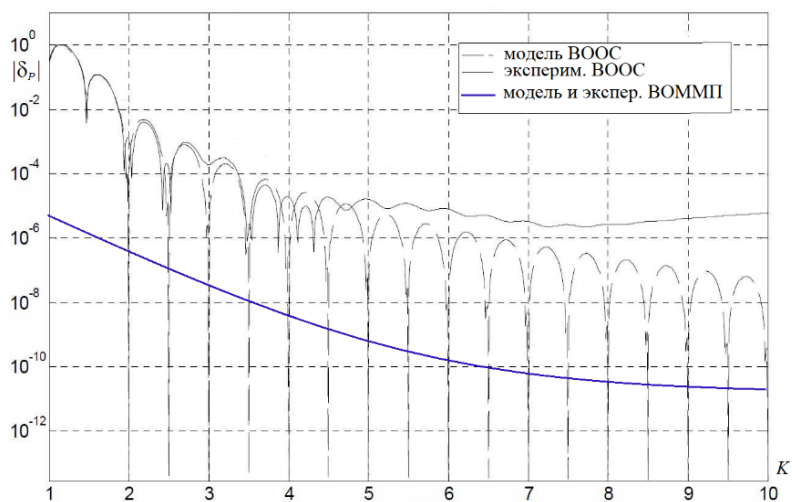


Рисунок 7 – Сравнение относительной погрешности  $\delta$  расчета активной мощности двумя алгоритмами (ВООС и ВОММП) от числа периодов наблюдения сигналов  $K$  в модельном компьютерном и реальном экспериментах

В результате проведения модельных экспериментов по оцениванию активной мощности всеми исследуемыми методами были определены относительные скорости работы алгоритмов, которые характеризовались временем, требуемым для вычисления измеряемых параметров. Краткие характеристики исследуемых методов и скорости работы алгоритмов, реализующих их, представлены в таблице.

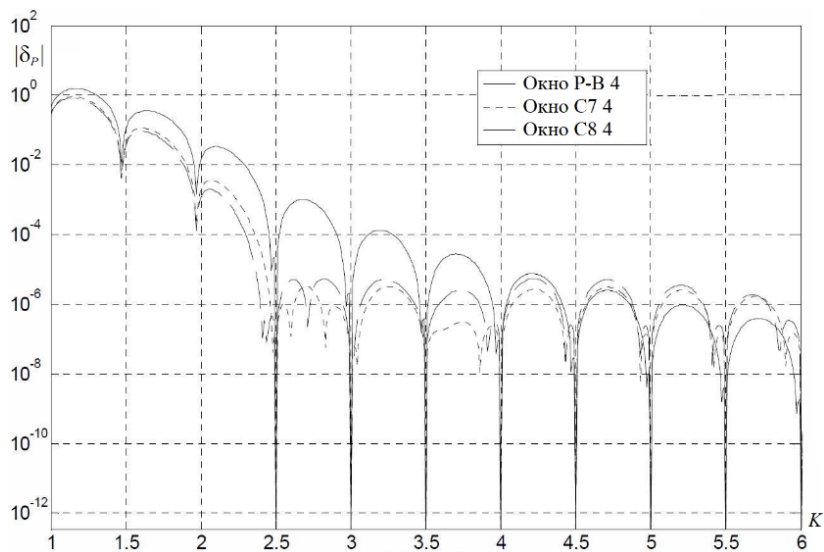


Рисунок 8 – Сравнение относительной погрешности  $\delta$  расчета активной мощности алгоритмом ВООС с окнами сглаживания Райфа – Винсента (Р–В), С7 и С8 из работы [14] в зависимости от числа периодов наблюдения сигналов  $K$

Таблица – Сравнение точности и времени вычисления исследуемых алгоритмов

Алгоритм	Основные свойства, преимущества и недостатки каждого метода	Относительное время счета
ВООС	Простой, быстрый, но низкой точности	1
ИПДВО	Наиболее точный при отсутствии постоянной составляющей, интер- и субгармоник (при их наличии не работает). Точность зависит от точности измерения частоты сигнала	3,7 – линейная (8,7 – сплайн-интерполяция)
ЧООС	Быстрый, который дает (с точностью, определяемой вычислением БПФ) оценку, совпадающую с ВООС	1,3
ЧООСИ	Использует интерполяцию ДПФ на основе выбираемого количества линий спектра ДПФ. Быстрый. Более точный, чем ВООС. Порядок окон и количество точек интерполяции выбираются в соответствии с уровнем аддитивного шума	1,3
ОЧОИК	Самый медленный с самой низкой точностью, но единственный, который позволяет обрабатывать заданную полосу частот спектра мощности	47 (для первых 50 гармоник)
ЧООСИР	Относительно медленный, но высокоточный (точность сравнима с ЧООС). Не чувствителен к субгармоникам, но дает низкую точность при малых ОСШ	8,7
ВОММП	Самый точный и относительно быстрый метод оценки	2

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье сравнивались шесть известных алгоритмов расчета мощности, основанных на ЦОС, с предложенным авторами (из работ [32, 39]). В ходе исследования были изучены показатели точности и скорости оценки активной мощности двух синусоидальных сигналов тока и напряжения основной частоты электросети. Было проведено сравнение результатов оценивания, полученных с помощью компьютерного моделирования и реальных измерений, осуществленных с использованием МПСД. Также были изучены влияния суб- и интергармоник, а также аддитивного нормального шума на точность оценивания. В конце работы были рассмотрены различные типы сглаживающих окон и их влияние на точность оценивания активной мощности.

Исследование показало, что применение алгоритмов изученных методов в сочетании с оконным сглаживанием результатов измерений (особенно при правильном выборе типа окна) позволяет снизить относительную погрешность оценки активной мощности в случае некогерентной дискретизации по времени или сократить время измерения для достижения допустимой относительной погрешности оценки. Результаты исследования свидетельствуют о том, что эффективность применения оконного сглаживания зависит от параметров, таких как: порядок окна  $L$ , количество точек интерполяции  $N$  и выбор более сложных алгоритмов обработки, который, в свою очередь, зависит от уровня шума в каналах напряжения и тока.

Компьютерное моделирование исследуемых алгоритмов целесообразно проводить для подбора вида сглаживающего окна и для нахождения минимального количества периодов сигнала  $T_{Sig}$ , в течение которых необходимо проводить отсчеты сигналов, чтобы достичь уровня относительной погрешности оценки мощности ниже уровня шума. С помощью компьютерного моделирования в среде MATLAB показано, что классические окна Райфа – Винсента (окна с наибольшими боковыми лепестками) низкого порядка (например, окно Ханна) наиболее подходят для оценки мощности, когда общее время измерения  $T_S$  достаточно велико.

Основной результат исследования состоит в том, что все исследуемые методы измерения активной мощности как во временной, так и частотной областях существенно уступают по точности оценивания предложенному авторами способу оценивания, основанному на ММП, который позволяет получать оценки, близкие по точности к нижней границе Крамера – Рао.

### Список источников

1. Cristaldi L. Power and Current Components Measurement in Three-Phase System Under Nonsinusoidal Conditions / L. Cristaldi, A. Ferrero, R. Ottoboni // Measurement. – 1994. – Vol. 12, № 3. – P. 251–273.
2. Novotny, M. Measurement of Active Power by Time-Domain Signal Processing / M. Novotny, M. Sedlacek // Measurement. – 2009. – Vol. 42, № 8. – P. 1139–1152.
3. Балабан, О. М. Проблема измерения реактивной мощности несинусоидальных сигналов в системах электроснабжения / О. М. Балабан, Е. В. Львова, А. А. Серанова, Ю. Б. Томашевский // Надежность и качество : сб. тр. XXII Междунар. симп. : в 2 т. – Пенза : ПГУ, 2017. – Т. 2. – С. 128–132.
4. Карташев, И. И. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов, Ю. В. Шаров, Р. Р. Насыров. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с.

5. Долинина, О. Н. Измерение мощности в промышленных электрических сетях цифровыми методами: обзор стандартов / О. Н. Долинина, О. А. Торопова, Е. В. Львова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2020. – № 2 (85). – С. 5–16.
6. Львов, А. А. Неоднозначность методов измерения реактивной мощности в промышленных сетях переменного тока / А. А. Львов, И. И. Артюхов, М. А. Соломин // Проблемы управления, обработки и передачи информации : сб. тр. IV Междунар. науч. конф. : в 2 т. – Саратов : Издательский дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 164–172.
7. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – Москва : Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
8. Zhang, J. Q. An Adaptive Window Function Method for Power Measurement / J. Q. Zhang, S. J. Ovaska // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – 2000. – Vol. 49, № 6. – P. 1194–1200.
9. Dolinina, O. Estimating Algorithm for Harmonics of Current and Voltage Signals When Measuring Reactive Power in Industrial Power Networks / O. Dolinina, O. Toropova, E. L'vova, N. Vagarina // Information and Communication Technologies for Research and Industry. – Springer Nature, Switzerland, 2020. – Vol. 337. – P. 250–271.
10. Желбаков, И. Н. Сравнительный анализ методов измерения реактивной мощности / И. Н. Желбаков, А. Н. Серов, А. А. Шатохин // Измерительная техника. – 2011. – № 1. – С. 64–76.
11. Artyukhov, I. I. A Method of Reactive Power Measurement in Industrial Alternative Current Mains Supplies / I. I. Artyukhov, M. A. Solomin, E. V. L'vova // Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov : IEEE, 2016. – P. 361–366.
12. Кандидов, В. П. Дискретное преобразование Фурье : учеб. пос. / В. П. Кандидов, С. С. Чесноков, С. А. Шленов. – Москва : Физический факультет МГУ, 2019. – 88 с.
13. Bracewell, R. N. The Fourier Transform and Its Applications / R. N. Bracewell. – McGraw-Hill Science-Engineering-Math, 1999. – 640 p.
14. Sedlacek, M. Iterative Design of DSP Cosine Windows by Placing Spectrum Zeros, and Some New Classes of DSP Cosine Windows / M. Sedlacek, Z. Stoudek // Measurement. – 2010. – Vol. 43, № 8. – P. 994–1011.
15. Agrež, D. Power Measurement in Non-coherent Sampling / D. Agrež // Measurement. – 2008. – Vol. 41, № 3. – P. 230–235.
16. Sedlacek, M. Interpolations in Frequency and Time Domain Used in FFT Spectrum Analysis / M. Sedlacek, M. Titera // Measurement. – 1998. – Vol. 23, № 3. – P. 185–189.
17. Schmidt, J. W. Staircase Algorithm and Construction of Convex Spline Interpolants up to the Continuity C3 / J. W. Schmidt // Computers and Mathematics with Applications J. – 1996. – Vol. 31, № 4/5. – P. 67–79.
18. Дробынин, М. Е. Компенсация влияния температуры в авиационных пьезорезистивных датчиках давления / М. Е. Дробынин, О. Д. М. Аль-Таи, Е. В. Филина, П. А. Львов, С. А. Кузин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 69–82.
19. Руфов, А. А. О выборе оконной функции при измерении среднеквадратического значения гармонического сигнала методом интегрирования / А. А. Руфов, А. Д. Поздняков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – № 4. – С. 34–39.
20. Абакумов, А. В. Исследование методов оценивания стандартного отклонения последовательности при контроле качества изделий / А. В. Абакумов, А. А. Львов, Е. Н. Скрипаль, Ю. А. Ульянина // Надежность и качество : сб. тр. Междунар. симп. : в 2 т. – Пенза : ПГУ, 2018. – Т. 2. – С. 92–96.
21. Agrež, D. Dynamics of Frequency Estimation in the Frequency Domain / D. Agrež // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – 2007. – Vol. 56, № 6. – P. 2111–2118.
22. Radil, T. New Spectrum Leakage Correction Algorithm for Frequency Estimation of Power System Signals / T. Radil, P. M. Ramos, A. C. Serra // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Vol. 58, № 5. – P. 1670–1679.
23. Slepicka, D. Weighted Multipoint Interpolated DFT to Improve Amplitude Estimation of Multifrequency Signals / D. Slepicka, D. Agrež, H. Lapuh et al. // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – 2002. – Vol. 51, № 2. – P. 282–292.
24. Moutchkaev, A. S. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Theory and Algorithm / A. S. Moutchkaev, S.-H. Kong, A. A. L'vov // Proc. of Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia : IEEE, 2016. – Vol. 2. – P. 442–447.
25. Moutchkaev, A. S. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Analysis and Results / A. S. Moutchkaev, S.-H. Kong, A. A. L'vov // Proc. of Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov : IEEE, 2016. – Vol. 2. – P. 448–455.
26. Львов, А. А. Сравнение методов оценивания параметров квазигармонических сигналов / А. А. Львов, А. А. Серанова, Р. В. Ермаков, А. С. Мучкаев // Радиотехника. – 2019. – № 8 (12). – С. 88–95.
27. L'vov, A. Comparison of Methods for Parameter Estimating of Superimposed Sinusoids / A. L'vov, A. Seranova, R. Ermakov, A. Sytnik, A. Muchkaev // Information and Communication Technologies for Research and Industry. – Springer Nature, Switzerland, 2020. – P. 140–151.
28. Agrež, D. Weighted Multipoint Interpolated DFT to Improve Amplitude Estimation of Multifrequency Signals / D. Agrež // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – 2007. – Vol. 51, № 2. – P. 282–292.
29. Belega, D. Multifrequency Signal Analysis by Interpolated DFT Method with Maximum Sidelobe Decay Windows / D. Belega, D. Dalet // Measurement. – 2009. – Vol. 42. – P. 420–426.
30. Rife, D. C. Use of Discrete Fourier Transform in Measurement of Frequencies and Levels of Tones / D. C. Rife, G. A. Vincent // Bell System Technical J. – 1976. – Vol. 42. – P. 197–228.

31. Nazrul, F. Grid Frequency Estimation Using Rife-Vincent Class I Window Based Discrete Fourier Transform / F. Nazrul, S. A. Masuma, H. I. Kafi, M. S. Reza, M. M. Hossain, F. Abedin // Proc. 2016 IEEE Int. WIE Conference on Electrical and Computer Engineering. – Pune : IEEE, 2016. – P. 246–249.
32. Долинина, О. Н. Сравнительный анализ двухканальных алгоритмов оценки параметров синусоидальных сигналов в системах управления качеством электроэнергии / О. Н. Долинина, Е. В. Львова, А. А. Серанова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – Вып. 5. – С. 46–59.
33. Львова, Е. В. Цифровые методы измерения мощности в силовых сетях: обзор стандартов / Е. В. Львова, К. С. Ефремов, П. О. Балабан, И. А. Самохин // Проблемы управления, обработки и передачи информации : сб. тр. V Междунар. юбилейн. науч. конф. – Саратов : ООО СОП «Лоди», 2019. – С. 518–528.
34. Sandrolini, L. Impact of Short-Time Fourier Transform Parameters on the Accuracy of EMI Spectra Estimates in the 2–150 kHz Supraharmonic Interval / L. Sandrolini, A. Mariscotti // Electric Power Systems Research. – 2021. – Vol. 195. – P.107130.
35. IEEE Standard for Digitizing Waveform Records. – IEEE Std., 2007. – P. 1057–2007.
36. Ramos, P. M. A New Sine-Fitting Algorithm for Accurate Amplitude and Phase Measurements in Two Channel Acquisition Systems / P. M. Ramos, A. C. Serra // Measurement. – 2008. – Vol. 41, № 2. – P. 135–143.
37. Львов, А. А. Оценивание параметров квазигармонических сигналов методом максимального правдоподобия / А. А. Львов, В. П. Глазков, В. П. Краснобельмов, Р. С. Коновалов, М. А. Соломин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 1 (77), вып. 4. – С. 147–154.
38. Казаков, К. В. Алгоритм двухканального оценивания параметров квазигармонических сигналов / К. В. Казаков, А. А. Львов, В. А. Пыльский // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – № 2 (43), вып. 4. – С. 38–41.
39. Львов, А. А. Сравнение методов оценивания параметров квазигармонических сигналов / А. А. Львов, А. А. Серанова, Р. В. Ермаков, А. С. Мучкаев // Радиотехника. – 2019. – № 8 (12). – С. 88–95.
40. L'vov, A. A. A Novel Parameter Estimation Technique for Software Defined Radio System Based on Broadband Multi-port Receiver / A. A. L'vov, R. V. Geranin, N. Semezhev, P. A. L'vov, E. A. Moiseykina // Proc. 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications. – Omsk, 2015. – P. 320–324.
41. L'vov, P. A. The Use of Current Loop Circuit as a Signal Conditioner for High Accuracy Digital Piezoresistive Pressure Sensors / P. A. L'vov, R. S. Konovalov, S. A. Kuzin, A. A. L'vov // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, Russia, 2016. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819039.
42. L'vov, A. A. Statistical Approach to Measurements with Microwave Multi-port Reflectometer and Optimization of Its Construction / A. A. L'vov, R. V. Geranin, N. Semezhev, P. A. L'vov // Proc. of Microwave and Radio Electronics Week and 14th Conf. on Microwave Techniques. – Pardubice : IEEE, 2015. – P. 179–183.
43. L'vov, A. A. Statistical Estimation of the Complex Reflection Coefficient of Microwave Loads Using a Multi-Port Reflectometer / A. A. L'vov, A. A. Morzhakov // Proc. 1995 SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronic Conf. – Rio-de-Janeiro : IEEE, 1995. – Vol. 2. – P. 685–689.

### References

- Cristaldi, L., Ferrero, A., Ottoboni, R. Power and Current Components Measurement in Three-Phase System Under Nonsinusoidal Conditions. *Measurement*, 1994, vol. 12, no. 3, pp. 251–273.
- Novotny, M., Sedlacek, M. Measurement of Active Power by Time-Domain Signal Processing. *Measurement*, 2009, vol. 42, no. 8, pp. 1139–1152.
- Balaban, O. M., L'vova, E. V., Seranova, A. A., Tomashevskiy, Yu. B. The problem of measuring the reactive power of non-sinusoidal signals in power supply systems. *Reliability and quality : proc. XXII Int. symp.* : in 2 vol. Penza, Penza State University, 2017, vol. 2, pp. 128–132.
- Kartashev, I. I., Tulskey, V. N., Shamonov, R. G., Sharov, Yu. V., Nasyrov, R. R. *Electricity quality management*. Moscow, MPEI Publishing House, 2017. 347 p.
- Dolinina, O. N., Toropova, O. A., Lvova, E. V. Measuring power in industrial electrical networks using digital methods: a review of standards. *Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2020, no. 2 (85), pp. 5–16.
- Lvov, A. A., Artyukhov, I. I., Solomin, M. A. Ambiguity of methods for measuring reactive power in industrial AC networks. *Problems of control, processing and information transmission : proc. IV Int. scientific conf.* : in 2 vol. Saratov, Wright-Expo Publishing House, 2015, vol. 2, pp. 164–172.
- Zhezhelenko, I. V., Saenko, Yu. L. *Quality of electricity at industrial enterprises*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 261 p.
- Zhang, J. Q., Ovaska, S. J. An Adaptive Window Function Method for Power Measurement. *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, 2000, vol. 49, no. 6, pp. 1194–1200.
- Dolinina, O., Toropova, O., L'vova, E., Vagarina, N. Estimating Algorithm for Harmonics of Current and Voltage Signals When Measuring Reactive Power in Industrial Power Networks. *Information and Communication Technologies for Research and Industry*. Springer Nature Switzerland, 2020, vol. 337, pp. 250–271.
- Zhelbakov, I. N., Serov, A. N., Shatokhin, A. A. Comparative analysis of methods for reactive power measuring. *Measuring technology*, 2011, no. 1, pp. 64–76.
- Artyukhov, I. I., Solomin, M. A., L'vova, E. V. A Method of Reactive Power Measurement in Industrial Alternative Current Mains Supplies. *Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, IEEE, 2016, pp. 361–366.
- Kandidov, V. P., Chesnokov, S. S., Shlenov, S. A. Kandidov, V. P. *Discrete Fourier transform : textbook*. Moscow, Faculty of Physics of Moscow State University, 2019. 88 p.

13. Bracewell, R. N. *The Fourier Transform and Its Applications*. McGraw-Hill Science-Engineering-Math, 1999. 640 p.
14. Sedlacek, M., Stoudek, Z. Iterative Design of DSP Cosine Windows by Placing Spectrum Zeros, and Some New Classes of DSP Cosine Windows. *Measurement*, 2010, vol. 43, no. 8, pp. 994–1011.
15. Agrež, D. Power Measurement in Non-coherent Sampling. *Measurement*, 2008, vol. 41, no. 3, pp. 230–235.
16. Sedlacek, M., Titera, M. Interpolations in Frequency and Time Domain Used in FFT Spectrum Analysis. *Measurement*, 1998, vol. 23, no. 3, pp. 185–189.
17. Schmidt, J. W. Staircase Algorithm and Construction of Convex Spline Interpolants up to the Continuity C3. *Computers and Mathematics with Applications J.*, 1996. vol. 31. no. 4/5. pp. 67–79.
18. Drobynin, M. E., Al-Tai, O. D. M., Filina, E. V., Lvov, P. A., Kuzin, S. A. Compensation of the influence of temperature in aviation piezoresistive pressure sensors. *News of the Southern Federal University. Technical science*, 2021, no. 5, pp. 69–82.
19. Rufov, A. A., Pozdnyakov, A. D. On the choice of window function when measuring the root-mean-square value of a harmonic signal by the integration method. *Radio engineering and telecommunication systems*, 2014, no. 4, pp. 34–39.
20. Abakumov, A. V., Lvov, A. A., Skripal, E. N., Ulyanina, Yu. A. Study of methods for estimating the standard deviation of a sequence during quality control of products. *Reliability and quality : proc. Int. symp. : in 2 vol.* Penza, Penza State University, 2018, vol. 2, pp. 92–96.
21. Agrež, D. Dynamics of Frequency Estimation in the Frequency Domain. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2007, vol. 56, no. 6, pp. 2111–2118.
22. Radil, T., Ramos, P. M., Serra, A. C. New Spectrum Leakage Correction Algorithm for Frequency Estimation of Power System Signals. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58, no. 5, pp. 1670–1679.
23. Slepicka, D., Agrež, D., Lapuh, H. et al. Weighted Multipoint Interpolated DFT to Improve Amplitude Estimation of Multifrequency Signals. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2002, vol. 51, no. 2, pp. 282–292.
24. Moutchkaev, A. S., Kong, S.-H., L'vov, A. A. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Theory and Algorithm. *Proc. of Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, Russia, IEEE, 2016, vol. 2, pp. 442–447.
25. Moutchkaev, A. S., Kong, S.-H., L'vov, A. A. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Analysis and Results. *Proc. of Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, IEEE, 2016, vol. 2, pp. 448–455.
26. Lvov, A. A., Ermakov, R. V., Muchkaev, A. S. Comparison of methods for estimating parameters of quasi-harmonic signals. *Radio engineering*, 2019, no. 8 (12), pp. 88–95.
27. L'vov, A., Seranova, A., Ermakov, R., Sytnik, A., Muchkaev, A. Comparison of Methods for Parameter Estimating of Superimposed Sinusoids. *Information and Communication Technologies for Research and Industry*. Springer Nature, Switzerland, 2020, pp. 140–151.
28. Agrež, D. Weighted Multipoint Interpolated DFT to Improve Amplitude Estimation of Multifrequency Signals. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2007, vol. 51, no. 2, pp. 282–292.
29. Belega, D., Dalet, D. Multifrequency Signal Analysis by Interpolated DFT Method with Maximum Sidelobe Decay Windows. *Measurement*, 2009, vol. 42, pp. 420–426.
30. Rife, D. C., Vincent, G. A. Use of Discrete Fourier Transform in Measurement of Frequencies and Levels of Tones. *Bell System Technical J.*, 1976, vol. 42, pp. 197–228.
31. Nazrul, F., Masuma, S. A., Kafi, H. I., Reza, M. S., Hossain, M. M., Abedin, F. Grid Frequency Estimation Using Rife-Vincent Class I Window Based Discrete Fourier Transform. *Proc. 2016 IEEE Int. WIE Conference on Electrical and Computer Engineering*. Pune, IEEE, 2016, pp. 246–249.
32. Dolinina, O. N., Lvova, E. V., Seranova, A. A. Comparative analysis of two-channel algorithms for estimating the parameters of sinusoidal signals in power quality control systems. *News of Tula State University. Technical science*, 2018, issue 5, pp. 46–59.
33. Lvova, E. V., Efremov, K. S., Balaban, P. O., Samokhin, I. A. Digital methods for measuring power in power networks: a review of standards. *Problems of control, processing and transmission information : proc. V International anniversary scientific conf.* Saratov, LLC SOP “Lodi”, 2019, pp. 518–528.
34. Sandrolini, L., Mariscotti, A. Impact of Short-Time Fourier Transform Parameters on the Accuracy of EMI Spectra Estimates in the 2–150 kHz Supraharmonic Interval. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 195, p. 107130.
35. *IEEE Standard for Digitizing Waveform Records*. IEEE Std., 2007, pp. 1057–2007.
36. Ramos, P. M., Serra, A. C. A New Sine-Fitting Algorithm for Accurate Amplitude and Phase Measurements in Two Channel Acquisition Systems. *Measurement*, 2008, vol. 41, no. 2, pp. 135–143.
37. Lvov, A. A., Glazkov, V. P., Krasnobel'mov, V. P., Kononov, R. S., Solomin, M. A. Estimation of parameters of quasi-harmonic signals by the maximum likelihood method. *Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2014, no. 1 (77), issue 4, pp. 147–154.
38. Kazakov, K. V., Lvov, A. A., Pyl'sky, V. A. Algorithm for two-channel estimation of parameters of quasi-harmonic signals. *Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2009, no. 2 (43), issue 4, pp. 38–41.
39. Lvov, A. A., Seranova, A. A., Ermakov, R. V., Muchkaev, A. S. Comparison of methods for estimating parameters of quasi-harmonic signals. *Radio engineering*, 2019, no. 8 (12), pp. 88–95.
40. L'vov, A. A., Geranin, R. V., Semezhev, N., L'vov, P. A., Moiseykina, E. A. A Novel Parameter Estimation Technique for Software Defined Radio System Based on Broadband Multi-port Receiver. *Proc. 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications*. Omsk, 2015, pp. 320–324.

41. L'vov, P. A., Konovalov, R. S., Kuzin, S. A., L'vov, A. A. The Use of Current Loop Circuit as a Signal Conditioner for High Accuracy Digital Piezoresistive Pressure Sensors. *2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. Omsk, Russia, 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819039.

42. L'vov, A. A., Geranin, R. V., Semezhev, N., L'vov, P. A. Statistical Approach to Measurements with Microwave Multi-port Reflectometer and Optimization of Its Construction. *Proc. of Microwave and Radio Electronics Week and 14th Conf. on Microwave Techniques*. Pardubice, IEEE, 2015, pp. 179–183.

43. L'vov, A. A., Morzhakov, A. A. Statistical Estimation of the Complex Reflection Coefficient of Microwave Loads Using a Multi-Port Reflectometer. *Proc. 1995 SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronic Conf. Rio-de-Janeiro*, IEEE, 1995, vol. 2, pp. 685–689.

Статья поступила в редакцию 28.11.2023; одобрена после рецензирования 13.12.2023; принята к публикации 28.12.2023.

The article was submitted 28.11.2023; approved after reviewing 13.12.2023; accepted for publication 28.12.2023.

## 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 странице 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](http://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](http://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 учетом полей (все поля по 2,5 см), набран шрифтом Times New Roman, кегль 12, межстрочный интервал 1,0. В таблицах, подрисовочных надписях допускается уменьшенный шрифт – вплоть до 10 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

**2024  
№ 1 (65)**

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, верстка *Н.Н. Сахно*

Дата выхода в свет **30.04.2024 г.**

Цена свободная

Уч.-изд. 12,0. Усл. печ. л. 16,8.

Заказ № 4586. Тираж 500 экз. (первый завод – 22 экз.)

---

Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а  
тел. (8512) 24-66-60 (доб. 3; издательско-полиграфический отдел)  
E-mail: [asupress@yandex.ru](mailto:asupress@yandex.ru)

Отпечатано в Астраханской цифровой типографии  
414040, г. Астрахань, пл. К. Маркса, 33  
тел./факс (8512) 54-00-11, 73-40-40,  
E-mail: [a-d-t@mail.ru](mailto:a-d-t@mail.ru)