

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ



УПРАВЛЕНИЕ И ВЫСОКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ

2026
№2 (74)



ISSN 2074-1707

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В. Н. ТАТИЩЕВА

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2026

№ 1 (74)

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

2026

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

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

**2026
№ 2 (74)**

Редакционная коллегия

А.М. Лихтер, доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры физики, профессор кафедры информационных технологий, ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра «Рациональное использование природных ресурсов» 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

А.С. Катасёв, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем информационной безопасности Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ

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

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

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

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

А.В. Рыбаков, кандидат физико-математических наук; доцент кафедры технологии материалов и промышленной инженерии 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 Казахстан, 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. Фиопова, доктор технических наук, профессор, декан факультета Вычислительной техники, заведующая кафедрой «Информационное обеспечение управления и производства» Пензенского государственного университета

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

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

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

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

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

© Астраханский государственный университет,
имени В.Н. Татищева, 2026
© Гайфитдинова С. Ю., дизайн обложки, 2026

ASTRAKHAN TATISHCHEV STATE UNIVERSITY

PRIKASPIYSKIY ZHURNAL:
Upravlenie i Vysokie Tekhnologii

CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

2026
No. 2 (74)

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 Tatishchev State University
2026

Recommended by the Editorial and Publishing Board
of Astrakhan Tatishchev State University

**CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2026
No. 2 (74)**

Editorial Board

A.M. Likhter, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Consulting Professor of the Department of Physics, Professor of the Department of Information Technology, Leading Researcher of the Scientific and Educational Center "Rational Use of Natural Resources", Astrakhan Tatishchev State University (*Editor-in-Chief*)

I.V. Anikin, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Security System Department, 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

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

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 Tatishchev State University

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

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), Associate Professor, Department of Materials Technology and Industrial Engineering Astrakhan Tatishchev State University

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

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

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)

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 Tatishchev State University, 2026
© S. Yu. Gayfitdinova, cover design, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

А. А. Аженов, С. В. Нестеров

Моделирование курсового канала системы посадки СП-50 9–16

А. Е. Деркач

Модель повышения эффективности сети обмена данными
группы БПЛА-ретрансляторов с использованием
метода редукционной кластеризации..... 17–23

Н. Г. Гудиева

Нейросетевой метод решения системы дифференциальных
уравнений динамического межотраслевого баланса 24–32

Н. А. Мирошников, О. Б. Шагниева

Управление ориентацией платформы Стюарта на подвижном основании 33–38

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

А. А. Никифоров, М. А. Шаронов, Е. К. Порваткин, А. А. Львов

Моделирование качества электроснабжения
с применением цифровых двойников 39–49

А. Р. Панченко

Применение фишинга против текущего стандарта
беспарольной аутентификации FIDO2..... 50–60

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Д. А. Медведев, О. А. Ковалева, С. В. Ковалев

Анализ и оптимизация времени выполнения ключевых операций
в корпоративных информационных системах..... 61–72

В. А. Соловьев, А. В. Горелкин, С. О. Бардадым, Э. Д. Тураносов

Алгоритмы пространственно-временной обработки данных
в интеллектуальных реконфигурируемых поверхностях (RIS) 73–78

Д. С. Пономарев

Системный подход в задаче прогнозного управления рецептурой
химического производства на основе анализа временных данных 79–86

К. Д. Кузовлев, В. Ю. Кузнецова, Г. А. Попов

Междисциплинарные подходы к выявлению смысловой
и психоэмоциональной направленности аудиопотоков:
типология, уровни воздействия и методы детектирования..... 87–95

**А. Ю. Настасюк, М. Е. Селиванов, Н. А. Захарченко,
Н. Н. Кучеров, М. А. Лапина**

Современные методы интерпретации невербального поведения
человека в аффективных вычислениях 96–104

А. В. Христофорова, Т. В. Митрофанова

Топологический анализ семантического ландшафта
студенческих стартапов..... 105–114

А. Ю. Дмитриева

Системная модель трансформации и визуализации
неструктурированных данных 115–122

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

В. Г. Жуков, П. А. Алейников

Оценка безопасности обновлений прикладного программного обеспечения
в целевой информационной системе 123–136

М. А. Федоров, А. К. Новохрестов

Создание изолированного виртуального окружения
для генерации, захвата и передачи образцов трафика хост-системе 137–144

Н. Г. Гудиева

Информационное и математическое обеспечение задач
структурной устойчивости систем экономики 145–156

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

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Е. А. Вершинин

Оценка теплопроводности теплоотводов из арсенида бора
методами численного моделирования для повышения надёжности 157–163

Н. С. Солодовников

Экспериментальный прототип двухканального генератора сигналов
для физиотерапевтических исследований 164–173

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Ф. С. Солодовников

Положительный эффект применения беспроводных технологий
в мобильных медицинских приложениях 174–183

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 184

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM SYSTEMS

A. A. Azhenov, S. V. Nesterov

Modeling of the localizer channel of the SP-50 landing system 9–16

A. E. Derkach

Model of increasing the efficiency of the data exchange network
of a UAV-relays group using the reduction clustering method 17–23

N. G. Gudieva

Neural network method for solving a system
of differential equations of dynamic intersectoral balance 24–32

N. A. Miroshnikov, O. B. Shagniev

Control of Stewart platform orientation on a moving base 33–38

METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION PROTECTION, INFORMATION SECURITY

A. A. Nikiforov, M. A. Sharonov, E. K. Porvatkin, A. A. Lvov

Modeling of electric supply quality using digital twins 39–49

A. R. Panchenko

The use of phishing against the current FIDO2
password-free authentication standard 50–60

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

D. A. Medvedev, O. A. Kovaleva, S. A. Kovalev

Performance analysis and optimization of key operations
on corporate information systems 61–72

V. A. Solovyov, A. V. Gorelkin, S. O. Bardadym, E. D. Turanosov

Spatiotemporal data processing algorithms
for reconfigurable intelligent surfaces (RIS) 73–78

D. S. Ponomarev

A systematic approach to constructing hybrid neural network models
for predictive control of water treatment 79–86

K. D. Kuzovlev, V. Yu. Kuznetsova, G. A. Popov

Interdisciplinary approaches to identifying the meaning
and psychoemotional orientation of audio stream:
typology, levels of impact and detection methods 87–95

**A. Yu. Nastasyuk, M. E. Selivanov, N. A. Zakharchenko,
N. N. Kucherov, M. A. Lapina**

Modern methods for interpreting human nonverbal behavior
in affective computing 96–104

A. V. Khristoforova, T. V. Mitrofanova

Topological analysis of the semantic landscape of student startups 105–114

L. Yu. Dmitrieva	
System model of transformation and visualization of unstructured data	115–122

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

G. V. Zhukov, A. P. Aleinikov	
Security assessment of application software updates in the target information system	123–136

M. A. Fedorov, A. K. Novokhrestov	
Creating an isolated virtual environment for generating, capturing, and transmitting traffic samples to the host syste	137–144

N. G. Gudieva	
Information and mathematical support for the tasks of structural stability of economic systems	145–156

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

INFORMATION, MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

E. A. Vershinin	
A scientific approach to methodological and software assurance of the reliability of computing systems and their elements using boron arsenide heat sinks	157–163

N. S. Solodovnikov	
Experimental prototype of a two-channel signal generator for physiotherapy research	164–173

INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT

F. S. Solodovnikov	
The positive effect of the use of wireless nechnology in mobile medical applications	174–183

RULES FOR THE AUTHORS	184
------------------------------------	-----

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 004.421.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ КУРСОВОГО КАНАЛА СИСТЕМЫ ПОСАДКИ СП-50

Аженов Арсен Айболатович, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), филиал «Взлёт» МАИ в г. Ахтубинске, 416501, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5,

студент, ORCID: 0009-0003-2078-8499, e-mail: arsen.k5@list.ru

Нестеров Сергей Васильевич, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), филиал «Взлёт» МАИ в г. Ахтубинске, 416501, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0009-0003-8143-0730, e-mail: nesterov.vzlet@mail.ru

В филиале МАИ «Взлёт» имеется лабораторная установка системы посадки СП-50, которая используется студентами для изучения влияния радиопомех на основные параметры радиомаячной системы посадки. В связи с выходом оборудования из строя возникла необходимость разработки его макета или модели. В работе описана математическая модель формирования сигналов курсового канала в среде MathCad, представлена работа программы, которая реализована с использованием математических библиотек Python и графического инструмента Qt Designer. В компьютерной модели курсового канала системы посадки СП-50 можно наблюдать зависимость сигналов курсового радиомаяка от углового положения летательного аппарата. Интерфейс программы включает графики сигналов, индикатор курса и панель управления. Пользователь может задавать угол смещения самолёта и наблюдать результаты в режиме реального времени. Программа совместима с ОС Windows и может применяться в образовательных и исследовательских целях, в том числе при выполнении дипломных проектов.

Ключевые слова: курсовой радиомаяк, система посадки, MathCad, Python, компьютерная модель, Qt Designer

MODELING OF THE LOCALIZER CHANNEL OF THE SP-50 LANDING SYSTEM

Azhenov Arsen A., Moscow Aviation Institute (National Research University), Branch “Vzlet”, 5 Dobrolyubov St., Akhtubinsk, Astrakhan region, 416501, Russian Federation, student, ORCID: 0009-0003-2078-8499, e-mail: arsen.k5@list.ru

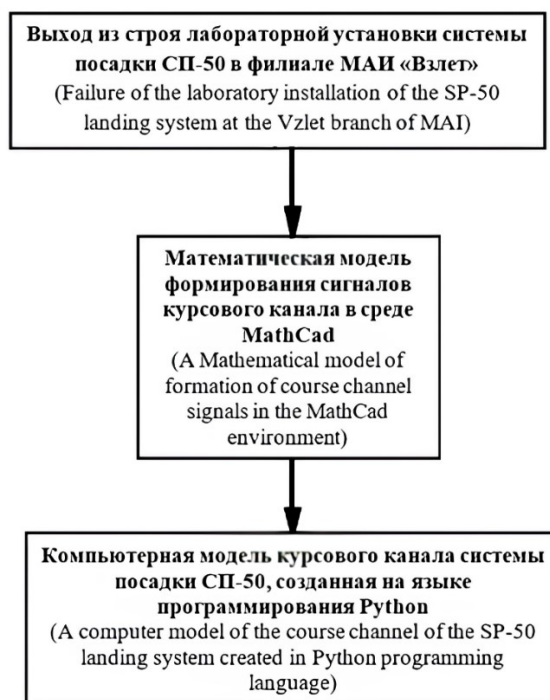
Nesterov Sergey V., Moscow Aviation Institute (National Research University), Branch “Vzlet”, 5 Dobrolyubov St., Akhtubinsk, Astrakhan region, 416501, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0009-0003-8143-0730, e-mail: nesterov.vzlet@mail.ru

The MAI Vzlet branch has a laboratory setup of the SP-50 landing system, which is used by students to study the effect of radio interference on the main parameters of the radio beacon landing system. Since the equipment failed, it became necessary to develop a prototype or model. This work describes a mathematical model for forming the signals of the localizer channel, developed in the MathCad environment and presents the operation of a program implemented using Python mathematical libraries and the Qt Designer graphical tool. The computer model of the SP-50 landing system's localizer channel demonstrates the dependence of the localizer beacon signals on the angular position of the aircraft. The software interface comprises signal waveform displays, a course indicator, and a control panel. The operator can set the aircraft's deviation angle and observe the results in real time. The software is compatible with the Windows operating system and is designed for educational and research applications, including the development of graduation theses.

Keywords: localizer beacon, landing system, MathCad, Python, computer model, Qt Designer

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Безопасность полётов на этапе посадки в решающей степени зависит от точности вывода самолёта на взлётно-посадочную полосу – крайне ограниченный наземный объект. Сложность данной операции усугубляется тем, что ей предшествует фаза значительного изменения лётных режимов. Для решения этих технологических задач и минимизации человеческого фактора были разработаны комплексные радиотехнические средства. Их главная функция – обеспечение управляемого и безопасного захода воздушного судна на посадку с последующим её выполнением [9].

В данной статье представлена математическая модель курсового радиомаяка, разработанная с использованием языка программирования Python [1] и графического инструмента Qt Designer [2]. Модель включает в себя показания индикатора положения самолёта, графики левого и правого антенных сигналов, а также визуализацию положения летательного аппарата относительно курсовой линии.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КУРСОВОГО КАНАЛА

Положение самолёта относительно плоскости посадочного курса определяют по курсовой линии, т. е. условной линии, образуемой в горизонтальной плоскости всеми точками, в которых отсутствует амплитудная модуляция принимаемого от маяка сигнала. Если летательный аппарат смещается вправо или влево от заданного курса, это отражается на характеристиках модуляции: меняется не только величина, но и полярность коэффициента модуляции. Если самолёт находится на курсе, то его курсовой угол (угол между курсовой линией и продольной осью самолёта) равен нулю. Если курсовой угол положителен, то самолёт летит левее курсовой линии, а если отрицателен – то правее [3]. Сигналы курсового радиомаяка (КРМ) можно разделить на сигналы переменной и постоянной фазы (рис. 1).

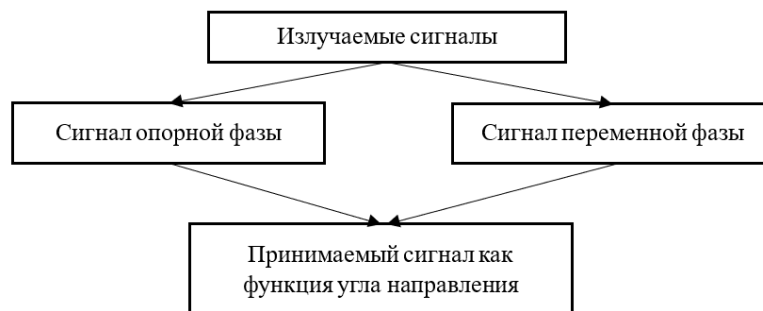


Рисунок 1 – Сигналы курсового радиомаяка

Излучаемые сигналы переменной фазы E_1 и E_2 являются амплитудно-модулированными и используют общую несущую. Модуляция данной несущей осуществляется двумя напряжениями частотой 60 Гц, находящимися в противофазном соотношении друг с другом:

$$E_1 = E_m [1 + m \cos(2\pi f_{m1} t)] \cos(2\pi f_n t), \quad (1)$$

$$E_2 = E_m [1 - m \cos(2\pi f_{m1} t)] \cos(2\pi f_n t). \quad (2)$$

где E_m – амплитуда напряжения сигнала;

m – коэффициент модуляции, равный 20 %;

f_{m1} – частота модуляции, равная 60 Гц;

f_n – несущая частота, устанавливаемая в диапазоне частот 100–115 МГц.

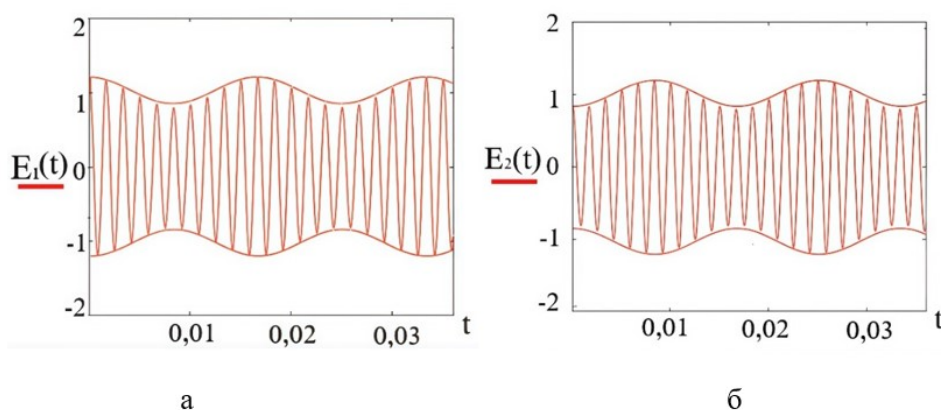


Рисунок 2 – Сигналы правой (а) и левой (б) антенн радиомаяка

Они излучаются двумя антеннами, расположенными относительно оси ВПП справа и слева. В момент пересечения самолётом осевой линии взлётно-посадочной полосы происходит сдвиг фазы огибающей сигнала на π . При нахождении самолёта на курсовой линии коэффициент модуляции m суммарного сигнала переменной фазы равен нулю [4, 5, 8, 10].

Сигнал опорной фазы формируется в результате двукратной модуляции, где амплитудной модуляции подвергается основная радионесущая. При этом модулирующим сигналом служит поднесущее колебание с фиксированной частотой, которое предварительно модулируется по частоте. Итоговый амплитудно-частотно модулированный сигнал излучается центральной антенной системы E_n (рис. 3):

$$E_n = E_m \{1 + m \cos[2\pi f_{m2} t + 2\pi \cos(2\pi f_{m1} t)]\} \cos(2\pi f_n t), \quad (3)$$

где f_{m2} – частота модуляции, равная 10 кГц.

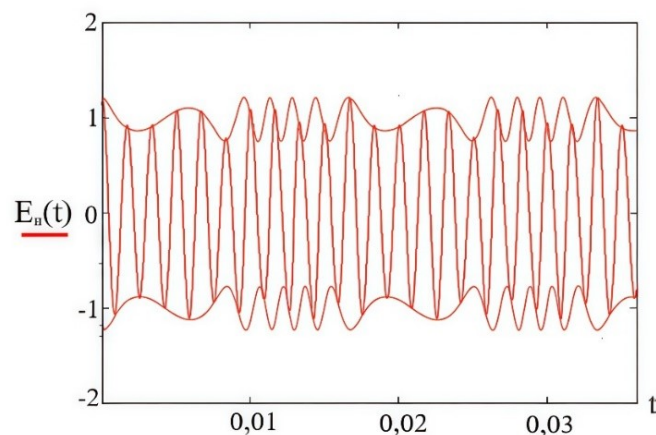


Рисунок 3 – Сигналы центральной антенны курсового радиомаяка

Алгоритм работы устройства КРМ (рис. 4) следующий.

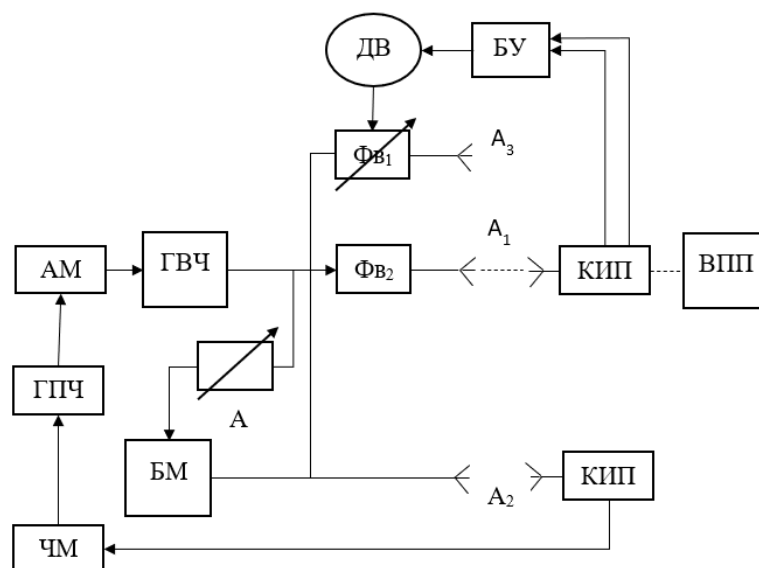


Рисунок 4 – Структурная схема курсового радиомаяка (КИП – контрольно-измерительный прибор, ЧМ – частотный модулятор, ГПЧ – генератор поднесущей частоты, АМ – амплитудный модулятор, ГВЧ – генератор высоких частот, БМ – балансный модулятор, Фв – фазовращатель, БУ – блок управления, ДВ – двигатель, ВПП – взлётно-посадочная полоса)

Функция контрольно-измерительного прибора заключается в приёме рабочего сигнала, излучаемого радиомаяком, с последующим его детектированием для выделения низкочастотной составляющей. Выделенное опорное напряжение подаётся на вход частотного модулятора, задающего девиацию частоты, вырабатываемой генератором поднесущих колебаний (ГПЧ). Далее сигнал с выхода ГПЧ поступает на амплитудный модулятор, где осуществляется модуляция по амплитуде высокочастотного несущего колебания, создаваемого генератором ГВЧ. Данный сигнал поступает на центральную антенну [9, 10].

Антенны, расположенные по бокам от оси ВПП, работают в режиме противофазного возбуждения и образуют сигналы переменной фазы [6, 7, 9, 10].

Система автоматической стабилизации посадочного курса нужна для того, чтобы при работе КРМ избавиться от различного рода нестабильностей, изменяющих положение в пространстве плоскости посадочного курса. Центральный прибор КИП, принимаемый на свою антенну сигнал маяка, выделяет с помощью фильтров напряжение переменной фазы и опорной. Блок управления (БУ) вырабатывает управляющий сигнал переменного тока, который после поступления на двигатель ДВ приводит к его вращению. С помощью Фв изменяется сдвиг токов боковых антенн. Двигатель остановится в том случае, если плоскость посадочного курса совместится с осью ВПП. Создаётся устойчивое состояние для системы автоматической стабилизации посадочного курса [3, 12, 13].

Алгоритм работы курсового радиоприёмника (рис. 5) следующий:

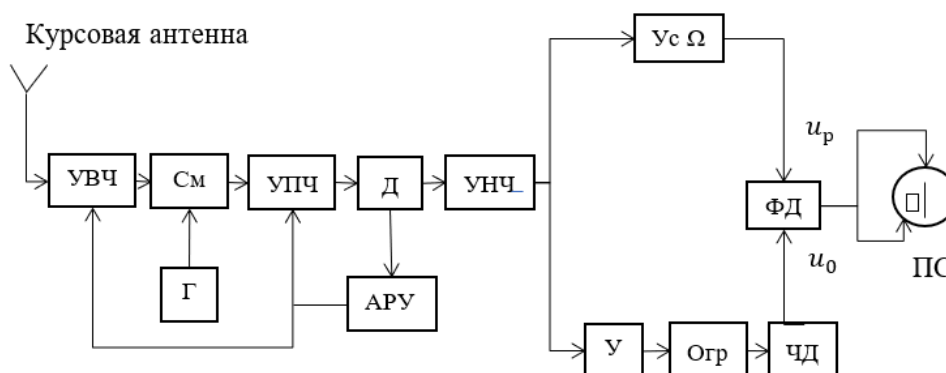


Рисунок 5 – Структурная схема курсового радиоприёмника (УВЧ – усилитель высоких частот, См – смеситель, Г – гетеродин, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, АРУ – автоматическая регулировка усиления, Д – детектор, Ус – усилитель, Огр – ограничитель, ЧД – частотный детектор, ФД – фазовый детектор, ПСП – прибор системы посадки)

Сигналы КРМ поступают на широкополосный усилитель высокой частоты УВЧ, затем подаются на смеситель См, в котором настраиваются на частоту КРМ при изменении частоты гетеродина Г. На усилителе промежуточной частоты УПЧ сигнал усиливается. Для обеспечения постоянства выходного напряжения приёмника при больших изменениях амплитуды выходных сигналов предусмотрена высокоэффективная схема автоматической регулировки усиления АРУ.

Далее составной сигнал, включающий напряжение переменной фазы и ЧМ-поднесущую, разделяется по двум независимым каналам обработки.

По каналу рабочего напряжения выделяется и усиливается компонент переменной фазы, который затем подаётся на фазовый детектор. По каналу опорного напряжения с помощью настроенного широкополосного усилителя извлекается поднесущая. Чтобы очистить её от помех по амплитуде, сигнал пропускается через ограничитель, после чего поступает на частотный детектор для выделения информативного параметра [3, 15].

Выходное напряжение, выработанное ФД:

$$U = KU_m, \quad (4)$$

где K – коэффициент пропорциональности;

U_m – амплитуда напряжения, поступающего на ФД.

Если напряжения постоянной и опорной фаз совпадают ($\varphi = 0$), то полярность выходного напряжения ФД положительная ($U > 0$). Если напряжения постоянной и опорной фаз находятся в противофазе $\varphi = 180$, то полярность отрицательная ($U < 0$).

ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ КУРСОВОГО КАНАЛА

Интерфейс программы, разработанной на Python с использованием Qt Designer, включает окно отображения, индикатор курса, панель настроек и инструментов (рис. 6) [14, 16].

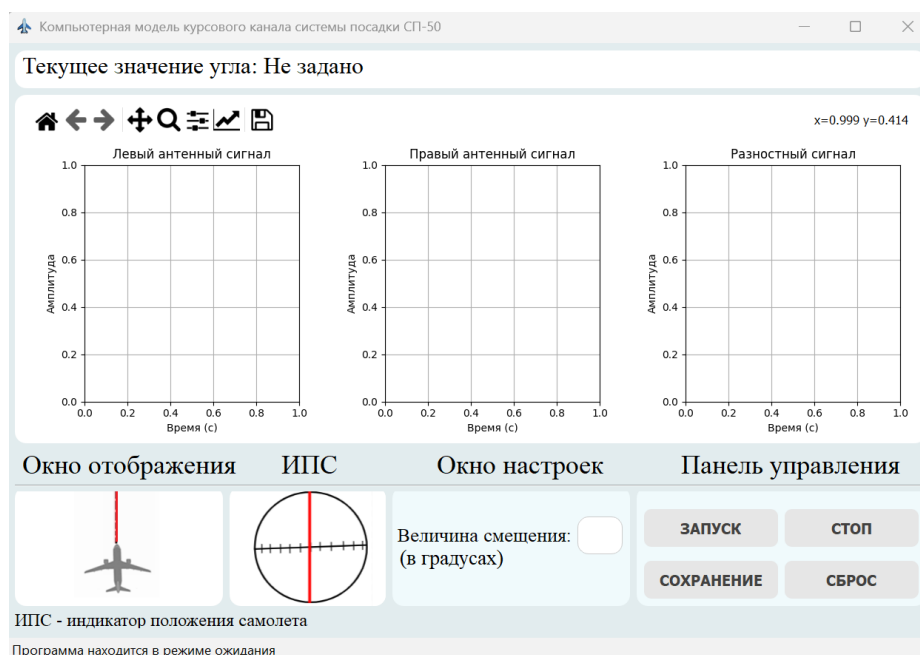


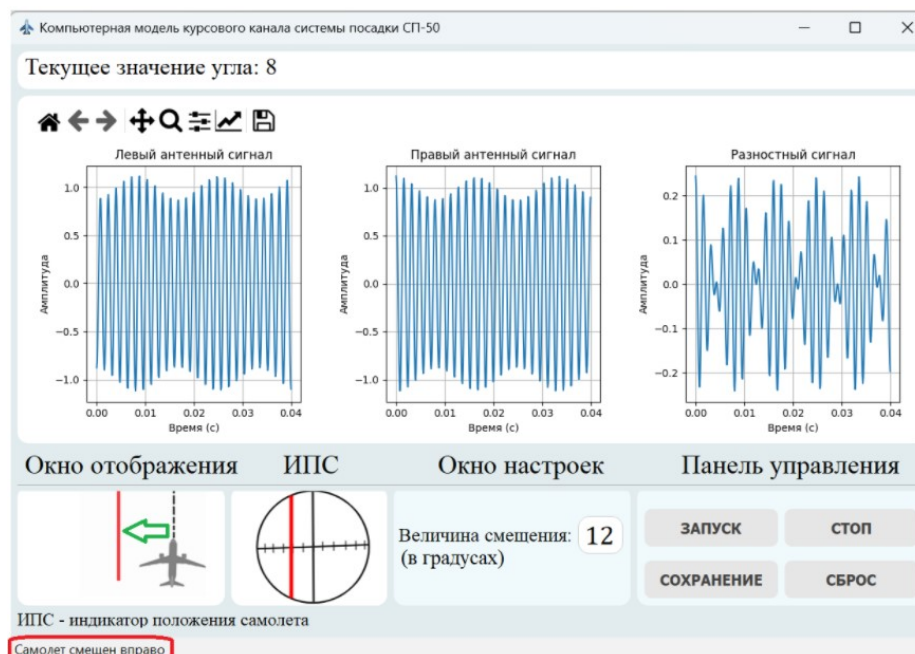
Рисунок 6 – Пользовательское окно компьютерной модели курсового радиомаяка

Интерфейс программы включает несколько функциональных элементов, расположенных в различных частях экрана. В верхней секции отображается текущее значение угла, которое динамически изменяется в процессе работы программы. Центральную область занимают графики, отображающие сигналы, поступающие от курсового радиомаяка. В левой нижней части интерфейса, под графиками, находится окно, предоставляющее вид сверху.

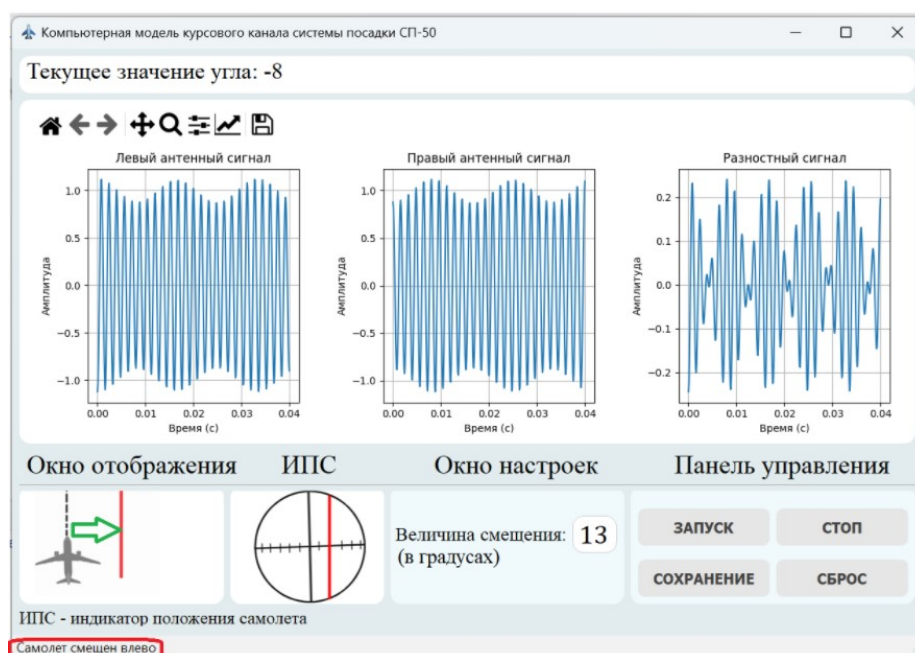
Справа от этого окна расположен индикатор, который визуализирует положение самолёта относительно заданного курса. Красная линия на индикаторе обозначает направление курса. В правом нижнем углу экрана размещён блок под названием «Окно настроек», содержащий четыре кнопки управления, реализованные с помощью элемента Push Button: «Запуск», «Стоп», «Сохранение» и «Сброс». Дополнительно в блоке настроек предусмотрено поле для ввода угла смещения, позволяющее пользователю задать отклонение самолёта от курса в градусах [14].

В нижней части интерфейса находится строка состояния, которая по умолчанию отображает текст «Программа находится в режиме ожидания». При запуске программы в этой строке выводится

информация о текущем статусе. Если разностный сигнал больше нуля, появляется сообщение «Самолёт смещён вправо»; если – меньше нуля, появляется сообщение «Самолёт смещён влево» (рис. 7). В противном случае отображается текст «Самолёт находится на курсе». Когда угол смещения достигает значения 0, что соответствует завершению процесса, в строке состояния появляется сообщение «Выполнение завершено» (рис. 8).



а)



б)

Рисунок 7 – Пользовательское окно компьютерной модели КРМ при смещении самолёта вправо (а), влево (б)

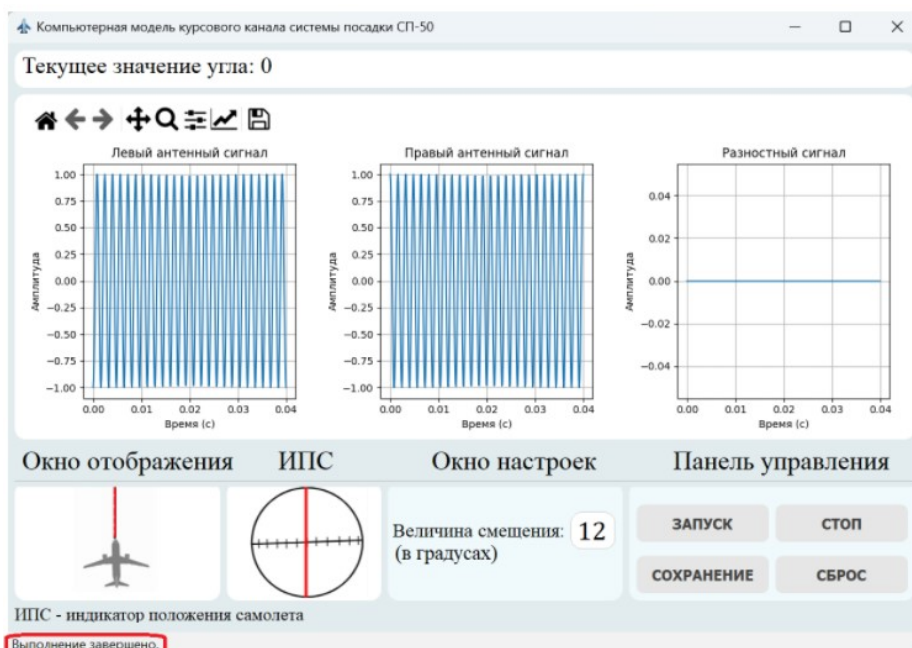


Рисунок 8 – Пользовательское окно компьютерной модели КРМ после завершения расчёта

Основную сложность при разработке компьютерной модели курсового канала вызвала реализация плавной и точной визуализации положения самолёта в окне отображения. Для решения этой задачи был использован класс `QPropertyAnimation` из библиотеки Qt, который обеспечивает анимацию свойств объектов [6].

Принцип работы `QPropertyAnimation` заключается в плавном изменении заданного свойства объекта в течение определённого времени. В рамках программы этот механизм применялся для анимированного перемещения индикатора самолёта относительно курсовой линии при изменении угла отклонения. `QPropertyAnimation` автоматически рассчитывает промежуточные значения между начальным и конечным состояниями, что позволяет добиться реалистичной и плавной визуализации движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Студенты могут наблюдать за изменением положения самолёта, а также за графиками левого и правого антенных сигналов и разностного сигнала в зависимости от угла. Кроме изучения работы курсового канала системы посадки СП-50, данная модель может быть использована в исследовательской части дипломных проектов.

Разработанная компьютерная модель может быть использована в учебном процессе по дисциплине «Основы радионавигационных систем».

Список источников

1. Беляевский, Л. С. Основы радионавигации : учебник для вузов / Л. С. Беляевский, В. С. Новиков, П. В. Олянюк ; под ред. Л. С. Беляевского. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1992. – 288 с.
2. Владимиров, В. Л. Средства и системы радионавигационного обеспечения летательных аппаратов / В. Л. Владимиров, В. В. Ковалев, Н. Н. Хмуров. – Москва : Воениздат, 1990. – 468 с.
3. Горбачев, О. А. Радиотехнические системы ближней навигации и посадки : учебное пособие / О. А. Горбачев, В. В. Ерохин, И. П. Пилченко, О. Н. Скрыпник. – Иркутск, 2006. – 300 с.
4. Грубов, В. А. Создание графических интерфейсов с использованием Qt Designer и PyQt / В. А. Грубов. – Санкт-Петербург : Питер, 2022. – 376 с.
5. Дронов, В. Python 3 и PyQt 5. Разработка приложений / В. Дронов, Н. Прохоренко. – Москва : Питер, 2023. – 456 с.
6. Дятлов, А. П. Корреляционная обработка широкополосных сигналов в автоматизированных комплексах радиомониторинга / А. П. Дятлов, Б. Х. Кульбикаян. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2013. – 332 с. – ISBN 978-5-9912-0332-6. – URL: <https://e.lanbook.com/book/55665> (дата обращения: 04.02.2026).
7. Кириллов, В. С. PyQt6: Разработка интерфейсов с использованием Qt Designer / В. С. Кириллов. – Москва : ДМК Пресс, 2023. – 480 с.
8. Ковальчук, И. Ф. Радионавигационное оборудование самолетов : учеб. пособие для учеб. заведений гражд. авиации / И. Ф. Ковальчук. – Москва : Транспорт, 1991. – 231 с.
9. Лебедев В. В. Повышение безопасности захода летательного аппарата на посадку при изменении метеоусловий / В. В. Лебедев, Д. К. Жиронкин // Наука и военная безопасность. – 2016. – № 1 (4). – С. 40–43. – EDN WYXKRX.
10. Олянюк, П. В. Радионавигационные устройства и системы гражданской авиации : учебник для вузов

/ П. В. Олянюк, Г. П. Астафьев, В. В. Грачев. – Москва : Транспорт, 1983. – 320 с.

11. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск : учебник / ред. В. Н. Тяпкин. – Красноярск : Сибирский федеральный университет (СФУ), 2011. – 536 с. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229340> (дата обращения: 24.10.2025).

12. Проектирование радиоприемных устройств : учебное пособие для вузов / под ред. А. П. Сиверса. – Москва : Советское радио, 1976. – 480с.

13. Проектирование радиоприемных устройств на базе аналоговых блоков : учебно-методическое пособие / Н. П. Никитин, В. В. Кийко. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 113 с.

14. Разработка Desktop приложений на Python и библиотеки PySide6/PyQt6. Часть 1. Установка и первое приложение на PySide6 // Habr. – URL: <https://habr.com/ru/articles/799037/> (дата обращения: 26.11.2025).

15. Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции LI «Гагаринские чтения 2025». – Москва : Перо, 2025. – 930 с.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662528 Российская Федерация. «Компьютерная модель курсового канала системы посадки СП-50»: заявл. 07.05.2025 : опубл. 22.05.2025 / С. В. Нестеров, А. А. Аженов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт». – EDN FDKHJW.

References

1. Belyaevsky, L. S., Novikov, V. S., Olyanyuk, P. V. *Fundamentals of radio navigation : textbook for higher education institutions*. Ed. by L. S. Belyaevsky. 2nd ed., rev. and exp. Moscow, Transport Publ., 1992. 288 p. (In Russ.).

2. Vladimirov, V. L., Kovalev, V. V., Khmurov, N. N. *Radio navigation support systems and equipment for aircraft*. Moscow, Voenizdat Publ., 1990. 468 p. (In Russ.).

3. Gorbachev, O. A., Erokhin, V. V., Pipchenko, I. P., Skrypnik, O. N. *Short-range radio navigation and landing systems : study guide*. Irkutsk, 2006. 300 p. (In Russ.).

4. Grubov, V. A. *Creating graphical interfaces using Qt Designer and PyQt*. Saint Petersburg, Piter, 2022. 376 p. (In Russ.).

5. Dronov, V., Prokhorenok, N. *Python 3 and PyQt 5: application development*. Moscow, Piter, 2023. 456 p. (In Russ.).

6. Dyatlov, A. P., Kulbikayan, B. Kh. *Correlation processing of wideband signals in automated radio monitoring systems*. Moscow, Goryachaya Liniya-Telecom, 2013. 332 p. ISBN 978-5-9912-0332-6. Available at: <https://e.lanbook.com/book/55665> (accessed 04.02.2026) (In Russ.).

7. Kirillov, V. S. *PyQt6: Interface development using Qt Designer*. Moscow, DMK Press, 2023. 480 p. (In Russ.).

8. Kovalchuk, I. F. *Aircraft radio navigation equipment : textbook for civil aviation educational institutions*. Moscow, Transport Publ., 1991. 231 p. (In Russ.).

9. Lebedev, V. V., Zhironkin D. K. Improving aircraft landing approach safety under changing weather conditions. *Science and Military Security*, 2016, no. 1 (4), pp. 40–43. EDN WYXKRX (In Russ.).

10. Olyanyuk, P. V., Astafyev, G. P., Grachev, V. V. *Civil aviation radio navigation devices and systems : textbook for higher education institutions*. Moscow : Transport, 1983. 320 p. (In Russ.).

11. *Fundamentals of radar station design for radio-technical troops : textbook*. Ed. by V. N. Tyapkin. Krasnoyarsk, Siberian Federal University (SFU), 2011. 536 p. Available at: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229340> (accessed 24.10.2025) (In Russ.).

12. *Design of radio receivers : textbook for higher education institutions*. Ed. by A. P. Sivers. Moscow, Sovetskoye Radio, 1976. 480 p. (In Russ.).

13. Nikitin, N. P., Kiyko, V. V. *Design of radio receivers based on analog units : teaching aid*. Yekaterinburg, GOU VPO UGTU-UIPI, 2004. 113 p. (In Russ.).

14. Desktop application development with Python and PySide6/PyQt6 libraries. Part 1: installation and first PySide6 Application. *Habr*. Available at: <https://habr.com/ru/articles/799037/> (accessed 26.11.2025) (In Russ.).

15. *Collection of Abstracts from the International Youth Scientific Conference "LI Gagarin Readings 2025"*. Moscow, Pero Publ., 2025. 930 p. (In Russ.).

16. Nesterov, S. V., Azhenov, A. A. *Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2025662528 (Russian Federation). "Computer Model of the SP-50 Landing System Localizer Channel"* : applic. 07.05.2025 : publ. 22.05.2025 ; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Aviation Institute". EDN FDKHJW (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 21.01.2026; одобрена после рецензирования 01.04.2026; принята к публикации 02.04.2026.

The article was submitted 21.06.2026; approved after reviewing 01.04.2026; accepted for publication 02.04.2026.

УДК 621.391:623.618

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.001

МОДЕЛЬ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ ГРУППЫ БПЛА-РЕТРАНСЛЯТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РЕДУКЦИОННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Деркач Алексей Евгеньевич, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, адъюнкт (аспирант), ORCID: 0009-0001-9612-2621, e-mail: alder2000@inbox.ru

Современные сети обмена данными на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) сталкиваются с проблемой обеспечения гарантированной доставки сообщений в условиях высокой динамики топологии и ограниченных ресурсов. Классические подходы к маршрутизации в крупномасштабных сетях обладают высокой вычислительной сложностью. Цель исследования – повышение эффективности современных сетей обмена данными группы БПЛА-ретрансляторов за счёт разработки модели редуцированной сети, максимизирующей вероятность своевременной доставки сообщений. Методы: предложен подход, основанный на редукции исходной сетевой структуры путём кластеризации узлов по критерию силы потенциальных связей. Для редуцированного взвешенного графа кластеров синтезируются оптимальные маршрутно-административные таблицы, максимизирующие вероятность своевременной доставки сообщения за допустимое время. Разработан алгоритм адаптивной динамической перекластеризации, инициируемый при падении вероятности доставки ниже порогового значения. Результаты: в ходе вычислительного эксперимента установлено, что предложенный метод позволяет повысить вероятность своевременной доставки на 8–12 % по сравнению с некластеризованной сетью и на 4–7 % по сравнению со статической кластеризацией при высокой интенсивности трафика. Показано, что адаптивный механизм обеспечивает более высокую устойчивость сети к отказам узлов. Выводы: разработанная модель редуциционной кластеризации позволяет существенно снизить вычислительную сложность задачи маршрутизации и повысить эффективность современных сетей обмена данными БПЛА-ретрансляторов по целевому показателю. Предложенный подход может быть использован при построении систем управления крупномасштабными динамическими сетями специального назначения.

Ключевые слова: сеть обмена данными, беспилотный летательный аппарат, ретранслятор, кластеризация, эффективность, маршрутизация, редукция сети, вероятностно-временные характеристики

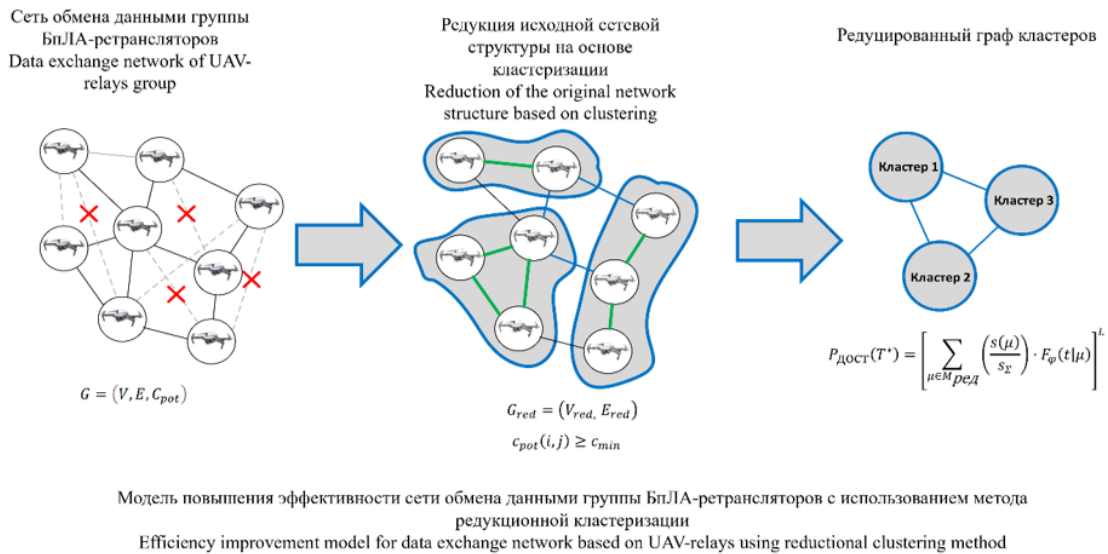
MODEL OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE DATA EXCHANGE NETWORK OF A UAV-RELAYS GROUP USING THE REDUCTION CLUSTERING METHOD

Derkach Alexey E., Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, adjunct (graduate student), ORCID: 0009-0001-9612-2621, e-mail: alder2000@inbox.ru

Modern data exchange networks (DENs) based on unmanned aerial vehicles (UAVs) face the problem of ensuring guaranteed message delivery under highly dynamic topology and limited resources. Classical routing approaches in large-scale networks have high computational complexity. The aim of the study is to improve the efficiency of a UAV-relay group DEN by developing a reduced network model that maximizes the probability of timely message delivery. Methods. An approach based on the reduction of the original network structure by clustering nodes according to the strength of potential links is proposed. For the reduced weighted cluster graph, optimal routing tables that maximize the probability of timely message delivery within a permissible time are synthesized. An algorithm for adaptive dynamic reclustering, triggered when the delivery probability falls below a threshold value, is developed. Results. A computational experiment established that the proposed method increases the probability of timely delivery by 8–12 % compared to a non-clustered network and by 4–7 % compared to static clustering under high traffic intensity. The adaptive mechanism is shown to provide higher network resilience to node failures. Conclusions. The developed reduction clustering model can significantly reduce the computational complexity of the routing problem and improve the efficiency of UAV-relay DENs according to the target indicator. The proposed approach can be used in building control systems for large-scale special-purpose dynamic networks.

Keywords: data exchange network, unmanned aerial vehicle, relay, clustering, efficiency, routing, network reduction, probabilistic-temporal characteristics

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Современные мобильные сети обмена данными (СОД) на основе групп беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1] характеризуются высокой динамичностью топологии, ограниченными ресурсами узлов и необходимостью обеспечения гарантированной доставки сообщений в реальном времени [2, 3]. В этих условиях ключевым показателем функционирования СОД являются вероятностно-временные характеристики (ВВХ), в частности вероятность доставки сообщения за допустимое время [4, 5]. Обеспечение высокой эффективности в крупномасштабных сетях БПЛА сопряжено со значительными вычислительными сложностями, связанными с необходимостью оперативного расчёта маршрутов передачи данных [6]. Это обуславливает необходимость разработки методов управления маршрутизацией, не требующих больших вычислительных мощностей.

В отличие от классических Flying Ad Hoc Networks (FANET), ориентированных на широкий спектр групповых миссий, в данной работе рассматривается специализированная сеть обмена данными, где все БПЛА выполняют роль ретрансляторов. Ключевым показателем эффективности такой сети является не общая связность или энергоэффективность, а ВВХ доставки сообщения за допустимое время. Предлагаемый подход к редукционной кластеризации направлен именно на максимизацию данного целевого показателя, что и составляет основное отличие от общих методов управления FANET [7].

Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является кластеризация сетевой структуры [8–10]. В данной работе кластеризация рассматривается как метод редукции (упрощения) исходной сетевой структуры. Путём агрегации узлов в кластеры и построения редуцированного графа достигается значительное снижение размерности задачи маршрутизации. Это позволяет синтезировать оптимальные или близкие к оптимальным таблицы маршрутизации для редуцированной сети, обеспечивая высокие значения ВВХ для сети в целом.

Целью работы является повышение эффективности СОД на основе БПЛА-ретрансляторов за счёт разработки модели редуцированной сети, позволяющей обеспечить максимизацию вероятности своевременной доставки сообщений.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Разработка формализованной модели редуцированной сетевой структуры на основе кластеризации.
2. Интеграция методики анализа ВВХ в процесс синтеза оптимальных таблиц маршрутизации для редуцированной сети.
3. Разработка алгоритмов адаптивной динамической кластеризации, инициируемой с учётом обеспечения выигрыша при переходе в новое состояние.
4. Оценка эффективности и устойчивости предложенного подхода на основе вычислительного эксперимента.

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ РЕДУКЦИОННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Исходная сеть представляется в виде взвешенного графа:

$$G = (V, E, C_{pot}), \quad (1)$$

где V – множество узлов (БПЛА-ретрансляторов);

E – множество потенциальных направлений связи;

C_{pot} – матрица потенциальных пропускных способностей, элемент $c_{pot}(i, j)$ которой характеризует максимально достижимую пропускную способность направления связи между узлами i и j с учётом расстояния, затухания и уровня помех.

Целевой функционал – вероятность своевременной доставки сообщения по сети в целом за время T :

$$P_{xost}(T) = F_{txot}(T) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $F_{txot}(T)$ – функция распределения времени доставки сообщения в СОД.

Редукция сети осуществляется путём агрегации узлов в кластеры на основе анализа матрицы C_{pot} . Узлы i и j объединяются в один кластер, если выполняется условие устойчивой связи, основанное на силе потенциального направления:

$$c_{pot}(i, j) \geq c_{min}, \quad (3)$$

где c_{min} – пороговое значение, определяющее минимальное качество (силу) направления связи для включения в кластер.

Направления связи с $c_{pot}(i, j) < c_{min}$ считаются слабыми и исключаются из рассмотрения при формировании кластеров, что и составляет суть редукции потенциальных связей (рис. 1).

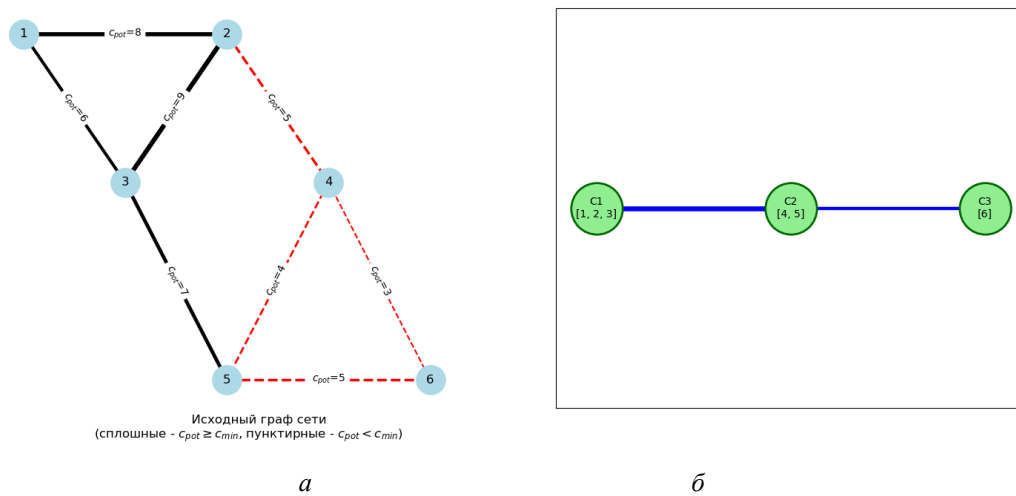


Рисунок 1 – Процесс редукции сети на основе потенциальных связей: а – исходный граф сети; б – редуцированный граф кластеров (жирные линии – сильные связи, исключённые – слабые)

В результате формируется редуцированный взвешенный граф кластеров:

$$G_{red} = (V_{red}, E_{red}), \quad (4)$$

где V_{red} – множество кластеров;

E_{red} – множество межкластерных связей, вес ребра в котором представляет собой усреднённую пропускную способность между узлами соответствующих кластеров.

Для редуцированного графа G_{red} задача оптимизации таблиц маршрутизации и передачи (ТМП) становится решаемой. Используется методика анализа ВВХ, изложенная в [3].

Интенсивность потока по маршруту μ в направлении $\langle i, j \rangle$ в редуцированной сети рассчитывается как:

$$s(\mu) = \lambda_{ij} \text{Pr}_j^{kl}, (k, l) \in \mu, \quad (5)$$

где Pr_j^{kl} – вероятность направления из кластера k в кластер l пакета с адресом j .

Функция распределения времени задержки пакета на маршруте μ определяется свёрткой распределений задержек на каждой межкластерной линии связи (k, l) . При экспоненциальном законе распределения:

$$F_\varphi(t|\mu) = \otimes \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{T(k, l)} \right) \right], (k, l) \in \mu, \quad (6)$$

где $T(k, l)$ – среднее время задержки на межкластерном направлении связи, зависящее от нагрузки $s(k, l)$ и пропускной способности $c_{red}(k, l)$.

Итоговая вероятность своевременной доставки сообщения длиной L пакетов для редуцированной сети вычисляется как:

$$P_{дост}(T^*) = \left[\sum_{\mu \in M_{ред}} \left(\frac{s(\mu)}{s_\Sigma} \right) \cdot F_\varphi(t|\mu) \right]^L, \mu \in M_{ред} \quad (7)$$

Оптимальные параметры ТМП P_{red} находятся методами математического программирования, максимизирующими значение $P_{xost}(T^*)$.

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОЙ ПЕРЕКЛАСТЕРИЗАЦИИ

Для поддержания эффективности сети в условиях динамики разработан алгоритм адаптивной перекластеризации. В отличие от периодической кластеризации, предложенный алгоритм инициирует процесс реконфигурации только при реальном ухудшении качества обслуживания (рис. 2).

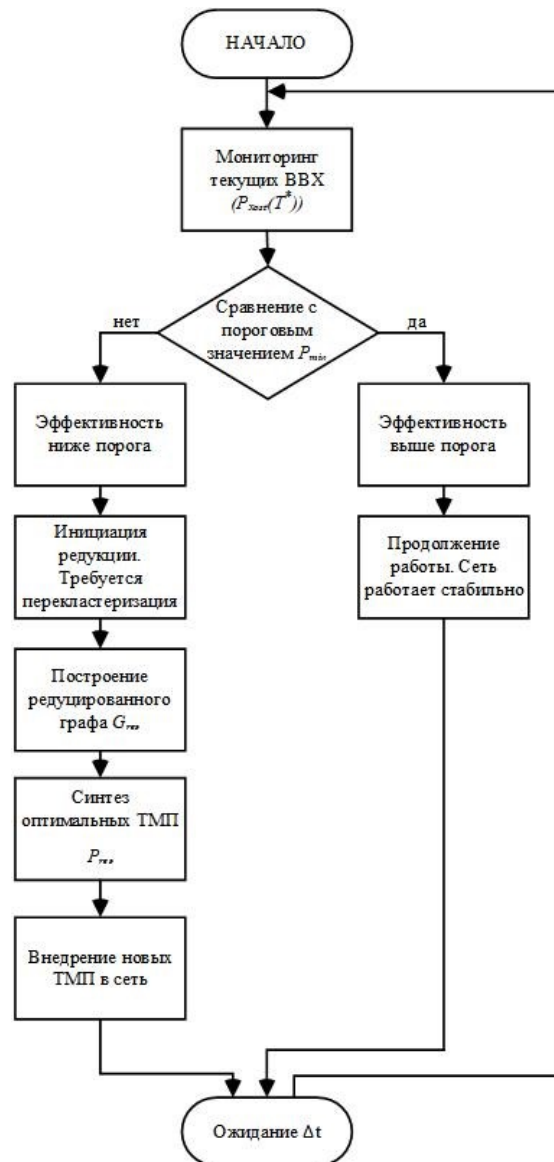


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма адаптивной перекластеризации

Алгоритм включает этапы:

1. Мониторинг текущих ВВХ $(P_{xost}(T^*))$.
2. Сравнение с пороговым значением P_{min} .
3. При ухудшении показателей – инициация редукции на основе актуальной матрицы C_{pot} .
4. Синтез новых ТМП для новой редуцированной структуры.
5. Внедрение новых ТМП в сеть.

Критерии оценки эффективности:

- первичный критерий (эффективность): вероятность своевременной доставки $P_{xost}(T^*)$;
- вторичный критерий (устойчивость): скорость восстановления $P_{xost}(T^*)$ после выхода узлов из строя;
- дополнительный критерий: коэффициент снижения служебной нагрузки, связанной с маршрутизацией.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для верификации модели проведён вычислительный эксперимент со следующими параметрами:

- количество узлов: 50 БПЛА;
- площадь района: 30 × 30 км;
- максимальная дальность связи: 10 км;
- порог для кластеризации c_{min} : 50 ед. пропускной способности;
- допустимое время доставки T^* : 100 мс.

Рассмотрены три сценария:

- сценарий А: некластеризованная сеть (базовая маршрутизация);
- сценарий В: сеть со статической кластеризацией;
- сценарий С: сеть с предложенным методом редукционной кластеризации на основе потенциальных связей.

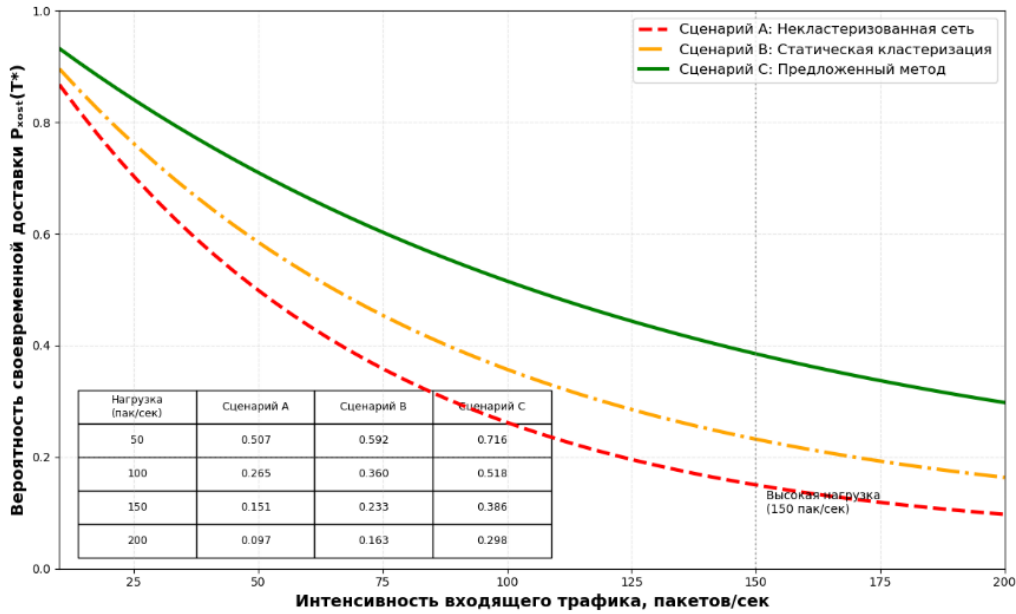


Рисунок 3 – Зависимость вероятности своевременной доставки от интенсивности входящего трафика

Результаты (рис. 3) показывают, что предложенный метод (сценарий С) обеспечивает значительный выигрыш в эффективности. При высокой нагрузке вероятность доставки в сценарии С на 8–12 % выше, чем в сценарии А, и на 4–7 % выше, чем в сценарии В. Это прямое следствие оптимизации потоков данных в редуцированной сети, из которой исключены слабые потенциальные направления связи, негативно влияющие на стабильность маршрутов.

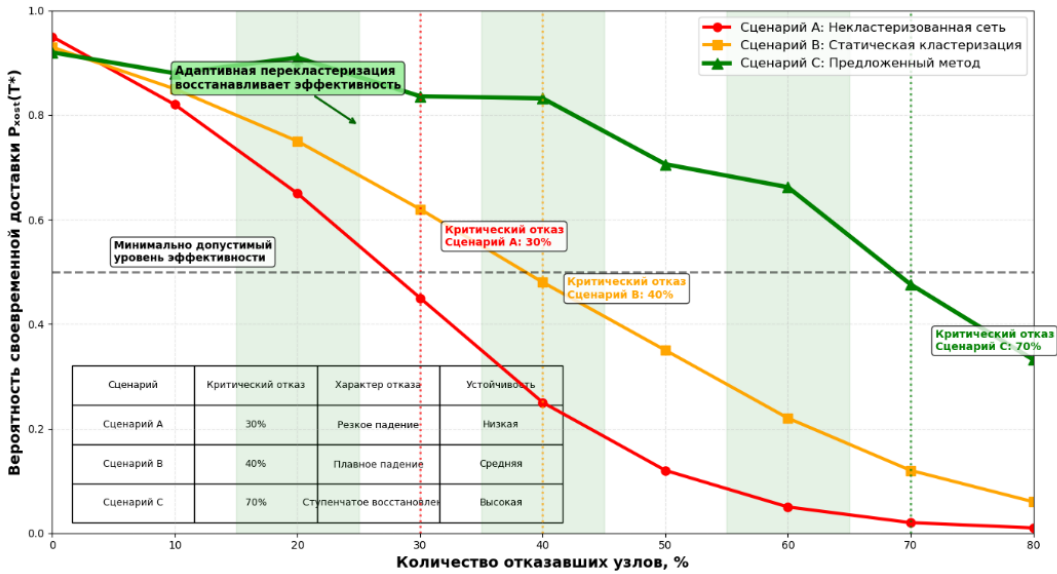


Рисунок 4 – Динамика вероятности доставки при последовательном отказе узлов

Редуцированная сеть (сценарий С) демонстрирует более высокую устойчивость (рис. 4). Падение эффективности происходит более плавно, а алгоритм адаптивной перекластеризации позволяет быстро реконфигурировать G_{red} и пересчитывать ТМП, перенаправляя потоки по сохранившимся кластерам, что приводит к частичному восстановлению показателя $P_{xost}(T^*)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования разработана модель редуцированной сети обмена данными группы ретрансляторов, размещённых на БпЛА, направленная на максимизацию вероятности своевременной доставки сообщений. Показано, что предложенный подход позволяет:

1. Повысить эффективность сети на 8–12 % по сравнению с некластеризованным сценарием и на 4–7 % по сравнению со статической кластеризацией за счёт оптимизации маршрутизации на редуцированном графе, содержащем только сильные связи.

2. Обеспечить высокую устойчивость к отказам узлов благодаря механизму адаптивной перекластеризации по порогу BVX.

3. Существенно снизить вычислительную сложность задачи управления маршрутизацией в крупномасштабных сетях за счёт редукции исходного графа.

Ограничения исследования: в работе принято предположение о наличии централизованного управляющего элемента, реализующего алгоритмы кластеризации и синтеза ТМП. Кроме того, рассмотрен только один класс трафика с одинаковыми требованиями к качеству обслуживания.

Перспективные направления дальнейших исследований включают разработку распределённых алгоритмов редукционной кластеризации, учёт мобильности узлов при формировании кластеров, а также интеграцию с методами машинного обучения для прогнозирования оптимальных моментов перекластеризации.

Список источников

1. Чертова, О. Г. Исследование возможности построения сети связи на базе беспилотных летательных аппаратов специального назначения / О. Г. Чертова // Сборник докладов Восьмой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (Москва, 26 октября 2017 года) / под общ. ред. Н. Э. Ненартовича. – Москва : ПАО «НПО «Алмаз», 2018. – С. 531–538.

2. Liu, Y. Cooperative Resource Allocation and Scheduling for 5G NR-based UAV Ad-Hoc Networks / Y. Liu, J. Wang, J. Li // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2023. – Vol. 72, № 2. – P. 2158–2172.

3. Arafat, M. Y. A Q-Learning-Based Topology-Aware Routing Protocol for Flying Ad Hoc Networks / M. Y. Arafat, S. Moh // IEEE Internet of Things Journal. – 2021. – Vol. 8, № 12. – P. 9775–9787.

4. Чуднов, А. М. Методика анализа вероятностно-временных характеристик обмена сообщениями в комплексе беспилотных летательных аппаратов / А. М. Чуднов, О. А. Губская, Я. В. Кичко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 11. – С. 117–124.

5. Chen, W. QoE-Driven Optimization for UAV-Assisted Mobile Edge Computing / W. Chen, J. Liu, H. Huang, Y. Zhang // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2022. – Vol. 21, № 8. – P. 6372–6385.

6. Самороков В. С. Создание сети БпЛА на железной дороге для обеспечения Wi-Fi и перспективы применения БпЛА // Сборник научных статей аспирантов ИПСС РУТ (МИИТ). – 2023. – Вып. 5. – С. 158–165.

7. Kim, T. FANET Routing Protocol Analysis for Multi-UAV-Based Reconnaissance Mobility Models / T. Kim, S. Lee, K. H. Kim, Y.-I. Jo // Drones. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 161.

8. Навар, Мохаммад, Моделирование маршрутизации в кластеризованном рое БпЛА с использованием генетического алгоритма / Навар Мохаммад, Л. И. Воронова, В. И. Воронов // Первая миля. – 2023. – № 6. – С. 46–52.

9. Alqudsi, Y. UAV swarms research, challenges, and future directions / Y. Alqudsi, M. Makaraci // Journal of Engineering and Applied Science. – 2025. – Vol. 72, № 1. – Article 18. – URL: <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00582-3> (дата обращения: 19.03.2026).

10. Медведева, Е. Г. Применение кластеризации в задачах размещения подвижных точек доступа в воздушно-наземных беспроводных сетях / Е. Г. Медведева, Э. М. Хайров, Н. А. Поляков, Ю. В. Гайдамака // Системы и средства информатики. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 25–37.

References

1. Chertova, O. G. A Study of the Feasibility of Building a Communications Network Based on Special-Purpose Unmanned Aerial Vehicles. *Collection of Papers Eighth Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists. (Moscow, October 26, 2017)*. Ed. by. ed. N. E. Nenartovita. Moscow, PJSC NPO Almaz, 2018, pp. 531–538 (In Russ.).

2. Liu, Y., Wang, J., Li, J. Cooperative Resource Allocation and Scheduling for 5G NR-based UAV Ad-Hoc Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, vol. 72, no. 2, pp. 2158–2172.

3. Arafat, M. Y., Moh, S. A Q-Learning-Based Topology-Aware Routing Protocol for Flying Ad Hoc Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, vol. 8, no. 12, pp. 9775–9787.

4. Chudnov, A. M., Gubskaya, O. A., Kichko, Ya. V. Methodology for analyzing probabilistic-temporal characteristics of message exchange in a complex of unmanned aerial vehicles. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, issue 11, pp. 117–124 (In Russ.).

5. Chen, W., Liu, J., Huang, H., Zhang Y. QoE-driven optimization for UAV-assisted mobile edge computing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, vol. 21, no. 8, pp. 6372–6385.

6. Samorokov, V. S. Creation of a UAV network on the railway to provide Wi-Fi and prospects for UAV application. *Collection of scientific articles by postgraduate students of the Institute of Railway Engineering (MIIT)*, 2023, issue 5, pp. 158–165 (In Russ.).
7. Kim, T., Lee S., Kim, K. H., Jo, Y.-I. FANET Routing Protocol Analysis for Multi-UAV-Based Reconnaissance Mobility Models. *Drones*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 161.
8. Navar, Mohammad, Voronova, L. I., Voronov, V. I. Modeling routing in a clustered swarm of UAVs using a genetic algorithm. *First Mile*, 2023, no. 6, pp. 46–52 (In Russ.).
9. Alqudsi, Y., Makaraci, M. UAV swarms research, challenges, and future directions. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2025, vol. 72, no. 1, article 18. Available at: <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00582-3> (accessed 19.03.2026).
10. Medvedeva, E. G., Khairov, E. M., Polyakov, N. A., Gaidamaka, Yu. V. Application of clustering in the problems of placing mobile access points in aerial-terrestrial wireless networks. *Systems and Means of Informatics*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 25–37 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 19.03.2026; одобрена после рецензирования 15.04.2026; принята к публикации 17.04.2026.

The article was submitted 19.03.2026; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 17.04.2026.

УДК 519.868

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.002

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА

Гудиева Наталья Григорьевна, Северо-Кавказский федеральный университет, 355002, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
ассистент кафедры вычислительной математики и кибернетики, ORCID: 0000-0001-9341-8446,
e-mail: gudieva82@bk.ru

Межотраслевой баланс представляет собой экономический инструмент, позволяющий детально анализировать и прогнозировать экономическую деятельность в стране или регионе. С практической точки зрения это система дифференциальных уравнений, описывающая взаимосвязи между различными отраслями экономики, от точности решения которой зависит эффективность экономического планирования и управления. Аналитические решения имеют ограничения и обеспечивают высокое качество прогноза лишь при определённых условиях. В работе сформулирована оптимизационная задача и предложен нейросетевой метод уточнения аналитических решений, на конкретном примере продемонстрирована его эффективность: метод позволил снизить среднюю относительную ошибку прогноза с 78,08 до 0,0013 % без привлечения больших вычислительных ресурсов за приемлемое время, показав при этом важность полученного аналитического решения при выборе начального приближения весов сети.

Ключевые слова: динамический межотраслевой баланс, матрица капитальных коэффициентов, матрица коэффициентов прямых затрат, матрица коэффициентов непроизводственного потребления, матрица промежуточного потребления, матрица коэффициентов полных затрат, система обыкновенных дифференциальных уравнений, сингулярное разложение, канонический вид системы обыкновенных дифференциальных уравнений, матричная экспонента, искусственная нейронная сеть, пользовательская инициализация весов искусственной нейронной сети

NEURAL NETWORK METHOD FOR SOLVING A SYSTEM OF DIFFERENTIAL EQUATIONS OF DYNAMIC INTERSECTORAL BALANCE

Gudieva Natalya G., North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355002, Russian Federation,

Assistant of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, ORCID: 0000-0001-9341-8446, e-mail: gudieva82@bk.ru

The intersectoral balance is an economic tool that allows for detailed analysis and forecasting of economic activity in a country or region. From a practical point of view, this is a system of differential equations describing the interrelationships between various sectors of the economy, the accuracy of which determines the effectiveness of economic planning and management. Analytical solutions have limitations and provide high-quality forecasts only under certain conditions. The paper formulates an optimization problem and proposes a neural network method for clarifying analytical solutions. Using a specific example, its effectiveness is demonstrated: the method made it possible to reduce the average relative forecast error from 78.08 to 0.0013% without using large computing resources in an acceptable time, while showing the importance of the analytical solution obtained when choosing the initial approximation of network weights.

Keywords: dynamic intersectoral balance, matrix of capital coefficients, matrix of direct cost coefficients, matrix of non-productive consumption coefficients, matrix of intermediate consumption, matrix of total cost coefficients, system of ordinary differential equations, singular decomposition, canonical form of the system of ordinary differential equations, matrix exponential, artificial neural network, user initialization of artificial neural network weights

ВВЕДЕНИЕ

Одним из подходов к исследованию динамических систем в экономике является описание модели с помощью дифференциальных уравнений межотраслевого баланса [1, 2]. Межотраслевой баланс – экономический инструмент, позволяющий детально анализировать и прогнозировать экономическую деятельность в стране или регионе [3]. Практически – это система дифференциальных уравнений, описывающая взаимосвязи между различными отраслями экономики.

Основная цель межотраслевого баланса – определить, какие товары и услуги производятся в каждой отрасли, какие ресурсы используются для их производства и какие товары и услуги потребляются каждой отраслью [4, 5]. Модель межотраслевого баланса предоставляет ценную информацию о взаимосвязях и зависимостях между различными отраслями экономики [6]. Она помогает определить, какие конкретно ресурсы используются для производства разных видов товаров и услуг. Например, можно выявить, сколько энергии, сырья, труда и других ресурсов требуется для создания определённой конечной продукции. Анализ балансов различных лет позволяет отследить изменения в затратах

ресурсов на различные цели. Это очень полезно при изучении трендов и долгосрочных изменений в экономике. Например, можно увидеть, как с течением времени меняется использование энергетических ресурсов или как изменяются затраты труда на определённую отрасль.

Без модели межотраслевого баланса анализ структурных изменений становится затруднительным. Она позволяет увидеть полную картину распределения ресурсов и объёмов производства между разными секторами экономики. Такой анализ особенно важен для принятия решений, например, при определении приоритетных отраслей для развития или планировании эффективного использования ресурсов. Информация, получаемая через модель межотраслевого баланса, ценна для понимания и анализа экономических процессов. Она предоставляет возможность изучать и предсказывать влияние изменений в одной отрасли на остальные, а также оценивать секторы, выявляя ключевые для экономического развития. Такой анализ позволяет повысить эффективность планирования, оптимизировать ресурсное распределение и принимать более обоснованные экономические решения.

Для построения межотраслевого баланса используется метод межотраслевых коэффициентов, метод производственных функций, метод экономических моделей и метод экспертных оценок [7].

Баланс «затраты-выпуск» также можно использовать для прогнозирования экономического роста или спада [8–10]. Например, если одна отрасль начнёт расти быстрее других, это может привести к увеличению спроса на продукцию других отраслей [11]. Однако, если эти отрасли не смогут удовлетворить этот спрос, это может вызвать экономические проблемы [8, 12].

Таким образом, межотраслевой баланс является важным инструментом анализа и прогнозирования экономики, позволяющим выявить потенциальные проблемы и принять меры по их решению.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА

В данной работе исследуется метод описания межотраслевого баланса с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Этот метод был предложен В. Леонтьевым ещё в 1952 году [7]. Параметрами модели являются B – матрица капитальных коэффициентов, A – матрица коэффициентов прямых затрат, $X(t)$ – векторная функция валового выпуска и VC – вектор непроизводственного потребления (Vector of Non-productive Consumption)

$$X(t) = B \cdot \frac{dX(t)}{dt} + A \cdot X(t) + VC(t),$$

или если использовать матрицу коэффициентов непроизводственного потребления C (Non-productive Consumption), то $VC(t) = C \cdot X(t)$, и уравнение примет вид

$$X(t) = B \cdot \frac{dX(t)}{dt} + A \cdot X(t) + C \cdot X(t), \quad X(0) = X_0. \quad (1)$$

Рассмотрим преобразование системы дифференциальных уравнений к каноническому виду, учитывая, что матрицы A , B и C рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} A &= MIC \cdot \text{diag}\left(\frac{1}{X_0}\right), \\ B &= \text{diag}\left(\frac{IV}{X_0}\right) \cdot TIC \cdot \text{diag}(Y) \cdot \text{diag}\left(\frac{\Delta t}{\Delta X}\right), \\ C &= \left(\left(E - \text{diag}\left(\frac{IV}{X_0}\right) \right) \cdot TIC \cdot \text{diag}(Y) - MIC \right) \cdot \text{diag}\left(\frac{1}{X_0}\right), \end{aligned}$$

где IV – вектор инвестиций (Investment Vector);

MIC – матрица промежуточного потребления (Matrix of Intermediate Consumption);

Y – вектор конечного спроса;

$TIC = (E - A)^{-1}$ – матрица коэффициентов полных затрат (Total Input Coefficients) (E – единичная матрица соответствующего размера);

$\Delta X = X_{end} - X_0$, где X_{end} – планируемый вектор валовых выпусков по прошествии времени Δt и X_0 – начальный (текущий) вектор валовых выпусков.

Важное примечание: повсюду в данной работе $\text{diag}\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) = \begin{pmatrix} \frac{\alpha_1}{\beta_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_2}{\beta_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\alpha_n}{\beta_n} \end{pmatrix}$, $\text{diag}\left(\frac{c}{\beta}\right) = \begin{pmatrix} \frac{c}{\beta_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{c}{\beta_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{c}{\beta_n} \end{pmatrix}$ для векторов $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ и $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ и константы c .

Выражение (1) может быть приведено к нормальной форме Коши

$$\frac{dX(t)}{dt} = GX(t), \quad G = B^{-1}(FFC - A - C), \quad X(0) = X_0, \quad (2)$$

где $FFC = TIC \cdot \text{diag}(Y) \cdot \text{diag}(1/X_0)$ – матрица коэффициентов финансовых потоков (Financial Flow Coefficients).

Матрица B^{-1} , обратная к вырожденной матрице B , заменяется на псевдообратную, вычисляемую посредством сингулярного разложения (Singular Value Decomposition – SVD) [13].

Важное примечание: для корректного обращения матрицы B посредством SVD необходимо переставить строки (и столбцы) исходных матриц MIC , IV , Y , ΔX , X_0 таким образом, чтобы нулевые строки (столбцы) MIC и IV оказались внизу (справа); строки и столбцы матрицы MIC должны быть переставлены соответствующим образом.

Решение задачи Коши (2) задаётся формулой

$$X(t) = e^{Gt} \cdot X_0, \quad (3)$$

где e^{Gt} – матричная экспонента.

Матричной экспонентой называется ряд

$$e^G = E + G + \frac{G^2}{2!} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{G^k}{k!},$$

причём данный ряд сходится абсолютно.

Соответственно, представление матричной экспоненты e^{Gt} может быть получено из выражения

$$e^{Gt} = E + Gt + \frac{G^2}{2!}t^2 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{G^k}{k!}t^k. \quad (4)$$

Псевдокод для получения аналитического решения (3) представлен в алгоритме 1.

Алгоритм 1. Получение аналитического решения задачи (2).

Вход: n , Δt , X_0 , ΔX , Y , MIC , IV .

Выход: $e^{G\Delta t}$, $X(\Delta t)$.

1: $X_0 = \text{swap}(X_0)$ # swap – перестановка строк согласно примечанию.

2: $\Delta X = \text{swap}(\Delta X)$.

3: $Y = \text{swap}(Y)$.

4: $MIC = \text{swap}(MIC)$.

5: $IV = \text{swap}(IV)$.

6: $A = MIC \cdot \text{diag}(1/X_0)$.

7: $TIC = (E - A)^{-1}$.

8: $B = \text{diag}(IV/X_0) \cdot TIC \cdot \text{diag}(Y) \cdot \text{diag}(\Delta t/\Delta X)$.

9: $C = ((E - \text{diag}(IV/X_0)) \cdot TIC \cdot \text{diag}(Y) - MIC) \cdot \text{diag}(1/X_0)$.

10: $FFC = TIC \cdot \text{diag}(Y) \cdot \text{diag}(1/X_0)$.

11: $B^{-1} = \text{SVD}(B)$.

12: $G = B^{-1}(FFC - A - C)$.

13: $X(t) = e^{Gt} \cdot X_0$.

14: **вернуть** $e^{G\Delta t}$, $X(\Delta t)$.

Интегральные кривые $X(t)$ решения (3) задачи Коши (2) будут содержать ошибки оценок выпуска. Источники ошибок: отсутствие прогнозных значений дефляторов по видам экономической деятельности и псевдообращение матрицы инерционностей. С увеличением долгосрочности прогноза будут возрастать абсолютные и относительные значения ошибок. Оценим ошибки прогнозирования расчётных показателей валового выпуска на конкретных данных.

Продemonстрируем особенности применения модели (1) для планирования экономической деятельности и оценим её точность на примере открытых данных из симметричных таблиц «затраты-

выпуск» Российской Федерации за 2011 [14] и 2016 [15] гг. Выбор указанного временного промежутка объясняется тем, что долгое время после 2016 г. базовые таблицы «затраты-выпуск» Российской Федерации не публиковались в открытом доступе.

Задачу можно интерпретировать следующим образом: имеются исходные данные таблицы «затраты-выпуск» за 2011 г. и планируемый (желаемый) валовый выпуск на 2016 г., требуется получить решение системы дифференциальных уравнений (1), которое максимально точно позволит спрогнозировать валовый выпуск по отраслям на 2016 г. Тогда, руководствуясь полученным решением, можно регулировать межотраслевое производство и потребление ресурсов с целью достижения запланированных показателей.

Решая сформулированную задачу, особое внимание уделим влиянию ошибок статистических данных на точность решения дифференциального уравнения (1).

Вычислим матрицы A , B и C по приведённым выше формулам для сформулированной задачи:

$$\begin{aligned} A &= MIC_{2011} \cdot \text{diag}\left(\frac{1}{X_{2011}}\right), \\ B &= \text{diag}\left(\frac{IV_{2011}}{X_{2011}}\right) \cdot TIC_{2011} \cdot \text{diag}(Y_{2011}) \cdot \text{diag}\left(\frac{5}{\Delta X}\right), \\ C &= \left(\left(E - \text{diag}\left(\frac{IV_{2011}}{X_{2011}}\right) \right) \cdot TIC_{2011} \cdot \text{diag}(Y_{2011}) - MIC_{2011} \right) \cdot \text{diag}\left(\frac{1}{X_{2011}}\right), \end{aligned}$$

где IV_{2011} – вектор инвестиций (столбец 108 соответствующей симметричной таблицы «затраты-выпуск» за 2011 г. [14]);

MIC_{2011} – матрица промежуточного потребления (столбцы 1–98 соответствующей симметричной таблицы «затраты-выпуск» за 2011 г. [14]);

Y_{2011} – вектор конечного спроса (столбец 110 соответствующей симметричной таблицы «затраты-выпуск» за 2011 г. [14]);

$TIC_{2011} = (E - A)^{-1}$ – матрица коэффициентов полных затрат;

$\Delta X = X_{2016} - X_{2011}$, X_{2016} и X_{2011} – векторы валовых выпусков (столбец 111 симметричной таблицы «затраты-выпуск» за 2016 [15] и 2011 [14] гг. соответственно).

Тогда задача Коши (2) формулируется следующим образом:

$$\frac{dX(t)}{dt} = GX(t), \quad G = B^{-1}(FFC_{2011} - A - C), \quad X(0) = X_{2011},$$

где $FFC_{2011} = TIC_{2011} \cdot \text{diag}(Y_{2011}) \cdot \text{diag}\left(\frac{1}{X_{2011}}\right)$ – матрица коэффициентов финансовых потоков.

Переходя к непосредственным вычислениям, прежде всего необходимо заменить матрицу B^{-1} на псевдообратную для B посредством SVD. Вычисление псевдообратной матрицы не представляет особых трудностей, поскольку SVD реализовано в большинстве известных математических пакетов и во многих языках программирования высокого уровня. Гораздо важнее отметить, что в соответствии с примечанием, строки (и столбцы) матриц и векторов MIC_{2011} , IV_{2011} , Y_{2011} , ΔX , X_{2011} должны быть переставлены таким образом, чтобы нулевые строки (и столбцы) MIC_{2011} и IV_{2011} оказались внизу (справа). Данное преобразование не является однозначным, поскольку вариантов переставить строки (и столбцы) для выполнения обозначенного условия множество. Для воспроизводимости полученного в работе результата укажем новый порядок следования строк (и столбцов) исходных матриц, полученный автором: 70, 52, 60, 89, 61, 72, 90, 9, 47, 86, 57, 56, 59, 55, 1, 46, 32, 71, 58, 7, 96, 76, 49, 63, 62, 14, 73, 21, 45, 88, 4, 41, 8, 53, 33, 6, 36, 24, 25, 40, 13, 22, 51, 44, 18, 64, 37, 42, 27, 38, 26, 54, 29, 65, 43, 77, 15, 28, 23, 35, 5, 20, 31, 16, 12, 79, 30, 19, 17, 39, 34, 80, 94, 50, 10, 78, 11, 48, 2, 66, 67, 68, 69, 74, 75, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 91, 92, 93, 97, 3, 95, 98.

Наличие 20 нулей в векторе IV симметричной таблицы «затраты-выпуск», связанное с разницей в номенклатуре таблиц 2011 и 2016 гг. или отсутствием данных, приводит к появлению нулевых строк в матрице B , а значит, модель (1) будет содержать 78 дифференциальных и 20 алгебраических уравнений. Таким образом, невозможно дать прогноз валового выпуска по этим 20 отраслям по прошествии времени Δt , используя лишь модель (1) (по той простой причине, что компоненты решения, соответствующие данным отраслям, не будут зависеть от времени t), поэтому в контексте модели (1) имеет смысл оценка качества прогноза только для 78 отраслей, для которых подобный прогноз возможен. Однако вне контекста модели (1) прогноз по оставшимся 20 отраслям также представляет большой интерес с точки зрения получения более целостной картины межотраслевых взаимодействий.

Решение (3) сформулированной задачи Коши задаётся формулой

$$X(t) = e^{Gt} \cdot X_{2011}.$$

Построив матричную экспоненту при $\Delta t = 2016 - 2011 = 5$ годам, получим расчётное частное решение $\tilde{X}_{2016}$ для показателей валового выпуска 2016 г. по отраслям:

$$\tilde{X}_{2016} = X(\Delta t = 5) = e^{5G} \cdot X_{2011}. \quad (5)$$

Вычисление матричной экспоненты e^{5G} , согласно формуле (4), так же как и SVD, реализовано в большинстве известных математических пакетов и во многих языках программирования высокого уровня.

Оценим среднюю относительную ошибку (Mean Relation Percentage Error – MRPE) расчётных показателей валового выпуска на 2016 г. При интерпретации результатов и оценке MRPE важно помнить, что частное решение $\tilde{X}_{2016}$ получено по данным таблицы «затраты-выпуск», строки (и столбцы) которой были переставлены, поэтому перед сравнением с точным решением X_{2016} следует либо переставить строки частного решения $\tilde{X}_{2016}$ на исходные места, либо переставить строки точного решения X_{2016} в соответствии с перестановкой исходных данных таблицы «затраты-выпуск» за 2011 г. MRPE, измеряемая в %, вычисляется стандартно

$$MRPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{2016i} - \tilde{X}_{2016i}|}{X_{2016i}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где n – количество отраслей.

Расчёт валового выпуска на 2016 г. по 78 категориям таблицы «затраты-выпуск», согласно (5), даёт MRPE = 16,72 %. Учитывая выбранный среднесрочный временной промежуток в 5 лет, достигнутую точность уже можно считать приемлемой. Однако, при построении прогноза по всем 98 категориям (с учётом тех, которые модель (1) учесть не способна) качество существенно ухудшается, MRPE = 78,08 %. Этот результат может быть улучшен за счёт уточнения значений матричной экспоненты.

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД УТОЧНЕНИЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА

Сформулируем оптимизационную задачу уточнения полученного решения (5) системы дифференциальных уравнений динамического межотраслевого баланса и решим её с использованием аппарата искусственных нейронных сетей (Artificial Neural Network – ANN).

В случае нулевой ошибки прогнозирования валового выпуска на 2016 г. выполняется равенство

$$X_{2016} - e^{5G} \cdot X_{2011} = 0, \quad (7)$$

но поскольку точное решение недостижимо, т. е. (7) никогда не будет выполнено, сформулируем оптимизационную задачу следующим образом

$$L(W) = \sum_{i=1}^n (X_{2016i} - W_i \cdot X_{2011})^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

где W – матрица варьируемых (обучаемых) параметров;

$W^{(0)} = e^{5G}$ – начальное приближение для обучаемых параметров;

$L(W)$ в терминологии ANN и машинного обучения (Machine Learning – ML) является выражением для оценки эмпирического риска или функцией потерь, которую требуется минимизировать.

Предлагается решать оптимизационную задачу (8) с использованием аппарата ANN. Постановка задачи (8) аналогична задаче восстановления регрессии. С точки зрения архитектуры, для решаемой практической задачи предлагается использовать полносвязную однослойную ANN (рис. 1) с 98 входами, на которые подаются компоненты вектора X_{2011} , и соответственно 98 выходами, на которых необходимо приблизить значения вектора X_{2016} . Поскольку ANN полносвязная, количество настраиваемых параметров (весов сети) равно $98 \times 98 = 9604$, веса смещения не используются, поскольку решаемая система дифференциальных уравнений была предварительно приведена к каноническому виду (2). В качестве начального приближения $W^{(0)}$ используем матричную экспоненту, полученную для частного решения $\tilde{X}_{2016}$, т. е. e^{5G} .

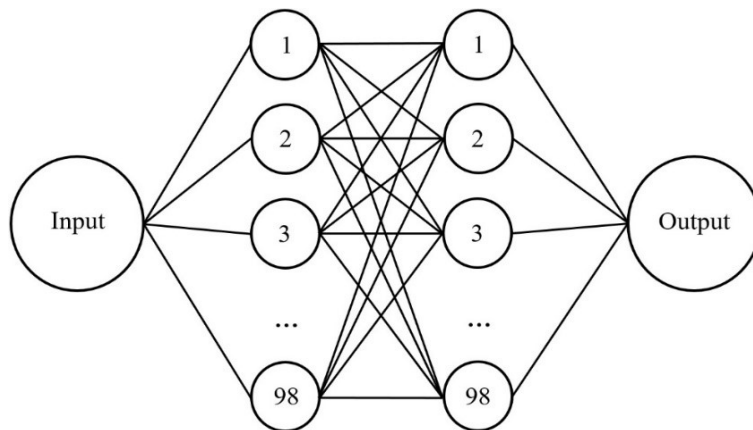


Рисунок 1 – Архитектура ANN для уточнения аналитического решения системы дифференциальных уравнений динамического межотраслевого баланса

Поскольку целью является построение преобразования, задающего перераспределение ресурсов, соответствующих валовому выпуску 2011 г. (X_{2011}) между отраслями таким образом, чтобы через $\Delta t = 5$ лет получить требуемый валовый выпуск 2016 года (X_{2016}), то основная задача заключается в нахождении именно матрицы весов ANN W , а не построении прогноза для целевого признака, как это бывает обычно в задачах, решаемых ANN.

Оценим эффективность подхода с использованием аналитического решения системы дифференциальных уравнений межотраслевого баланса для инициализации весов ANN. Для этого сравним качество решения, уточнённого нейронной сетью, веса которой инициализированы полученным аналитическим решением, и качество решения, уточнённого нейронной сетью с такой же архитектурой, веса которой инициализированы стандартно, методами библиотеки PyTorch [16]; также оценим количество эпох обучения, за которое это качество было достигнуто.

При обучении использовались следующие методы и параметры (неуказанные параметры установлены по умолчанию):

- функция потерь MSELoss, соответствующая (8);
- оптимизатор градиентного спуска Adaptive Moment Estimation [17] со скоростью обучения (параметром learning rate) 0,001;
- планировщик изменения скорости обучения ReduceLROnPlateau [18] с параметрами patience = 100 (количество эпох без улучшения функции потерь на тестовой выборке, после которых снижается learning rate), eps = 10^{-17} (минимальное изменение learning rate), threshold = 10^{-10} (необходимый порог улучшения функции потерь на тестовой выборке, чтобы эти изменения считались значимыми);
- ранняя остановка с параметром patience = 200 (количество эпох без значимого улучшения функции потерь на тестовой выборке, после которых обучение останавливается).

Отметим, что задача не является стандартной для применения искусственных нейронных сетей, поэтому значения некоторых параметров могут существенно отличаться от привычных.

Учитывая, что, по сути, требуется уточнить преобразование, позволяющее получить из набора входных данных набор выходных данных, аналогичный по размеру, обучающая выборка будет состоять лишь из одного объекта, отсюда большое количество эпох обучения и размер batch, равный 1. При этом тестовой выборки нет вовсе. Сформируем тестовую выборку следующим образом: исследуем решение, полученное после пользовательской инициализации весов ANN, и решения, полученные после стандартной инициализации весов, на устойчивость. Как уже было отмечено выше, в задаче отсутствует тестовая выборка, однако и задача не вполне стандартная для нейронной сети. Идея заключается в том, чтобы отследить изменение качества нейронной сети на тестовой выборке при различных изменениях (в рамках 0,1, 0,5 и 1 %) входных данных. Интерпретировать это можно следующим образом: отследим как изменится качество прогноза валового выпуска при недоиспользовании (перенесении) ресурсов отраслей не более чем на 0,1, 0,5 и 1 %, что в среднем по отраслям соответствует 1144,42 млн руб., 5722,08 млн руб., 11444,16 млн руб. Таким образом, были рассмотрены три различных тестовых выборки: в первой валовый выпуск за 2011 г. искажался не более чем на 0,1 % по каждой из отраслей, во второй – не более чем на 0,5 %, в третьей – не более чем на 1 %. Данный порог может варьироваться и должен быть согласован с отраслевым экспертом. Тестовые выборки формировались следующим образом: для каждой были сгенерированы по 1000 векторов из 98 компонент, каждая из которых являлась случайным числом из диапазона $[1 - \delta/100; 1 + \delta/100]$, где $\delta = 0,1, 0,5$ и 1 для первой, второй и третьей выборок соответственно. Далее каждый из сгенерированных векторов был поэлементно умножен на вектор валового выпуска за 2011 г. (X_{2011}), так были получены три тестовых выборки с искажёнными входными значениями, при этом целевая функция – вектор, соответствующий валовому выпуску 2016 г. (X_{2016}), – оставалась неизменной.

Перейдём непосредственно к сравнению качества при использовании стандартной инициализации весов нейронной сети и инициализации полученным аналитическим решением.

Для получения усреднённых метрик оценки качества и одновременно реализации стратегии мультистарта для поиска наилучшего начального приближения процесс обучения со стандартной инициализацией весов нейронной сети был запущен 1000 раз. При пользовательской инициализации аналитическим решением это не требуется. Результаты представлены в таблице, значения качества при $\delta = 0$ – это наилучшие значения, полученные для обучающей выборки.

На обучающей выборке (точнее при отсутствии контроля на тестовой выборке) ANN с инициализацией весов аналитическим решением показала чуть менее чем двукратное преимущество по качеству над лучшей из ANN, веса которых были инициализированы стандартно, при этом чуть менее чем двукратно уступив по длительности обучения (табл., $\delta = 0$). Однако результаты, полученные для тестовых выборок, представленные в таблице ($\delta = 0,1, \delta = 0,5, \delta = 1$), демонстрируют преимущество ANN с инициализацией весов полученным аналитическим решением по качеству в среднем в 3,7 раза, если сравнивать с лучшими решениями, полученными ANN со стандартной

инициализацией (рис. 2). При этом количество эпох, затраченное на обучение ANN с пользовательской инициализацией весов, неизменно меньше, чем количество эпох, затраченное на обучение ANN со стандартной инициализацией весов.

Таблица – Сравнение качества уточнённого решения при различной инициализации весов ANN

δ , %	$W^{(0)}$	MRPE, %	
0	PyTorch	Лучшее	0,0025 (308 эпох обучения)
		Среднее	0,0061 (657 эпох обучения)
	e^{5G}		0,0013 (615 эпох обучения)
0,1	PyTorch	Лучшее	25,33 (366 эпох обучения)
		среднее	31,82 (436 эпох обучения)
	e^{5G}		6,86 (231 эпох обучения)
0,5	PyTorch	лучшее	122,37 (222 эпох обучения)
		среднее	151,99 (416 эпох обучения)
	e^{5G}		33,14 (211 эпох обучения)
1	PyTorch	лучшее	246,46 (554 эпох обучения)
		среднее	299,87 (367 эпох обучения)
	e^{5G}		65,59 (183 эпох обучения)

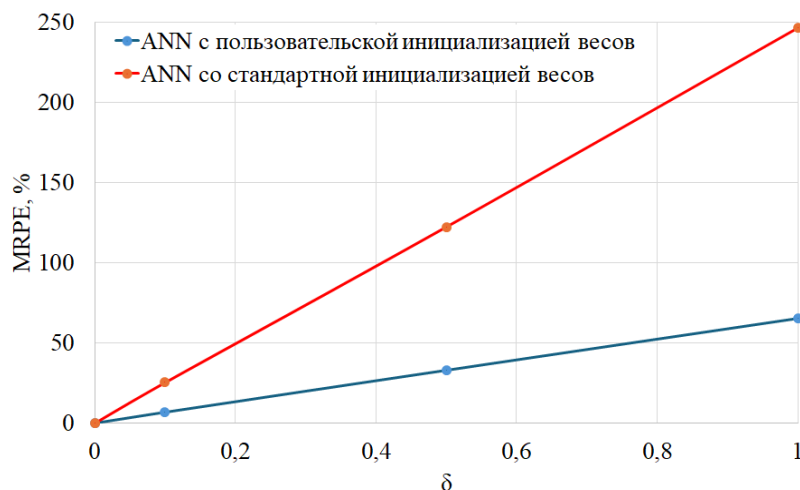


Рисунок 2 – Сравнение качества решений, полученных ANN с пользовательской и стандартной инициализацией весов

Таким образом, аналитическое решение (5) системы дифференциальных уравнений динамического межотраслевого баланса, используемое для инициализации весов искусственной нейронной сети, позволяет построить устойчивое уточнённое решение, превосходящее стандартное как по качеству, так и по скорости обучения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проясним следующий вопрос: почему при обучении со стандартной инициализацией весов не были использованы веса смещения и более сложная архитектура ANN?

Использование весов смещения действительно позволило бы существенно повысить качество нейронной сети на обучении, что будет показано в примере ниже, однако, возвращаясь к решаемой прикладной задаче, необходимо получить матрицу весов нейронной сети W , которая в некотором обобщённом смысле задаёт перераспределение ресурсов между отраслями с целью получения требуемого вектора валового выпуска. Такова практическая интерпретация матрицы обучаемых весов W , размером 98×98 , при этом невозможно сформулировать хоть сколько-нибудь адекватную интерпретацию для весов смещения в рамках поставленной задачи. Кроме того, использование весов смещения может привести к неприятным эффектам. Рассмотрим пример.

Решим поставленную задачу с использованием всё той же однослойной нейронной сети со стандартной инициализацией весов, но в этот раз веса смещения (bias) будут использованы (рис. 3).

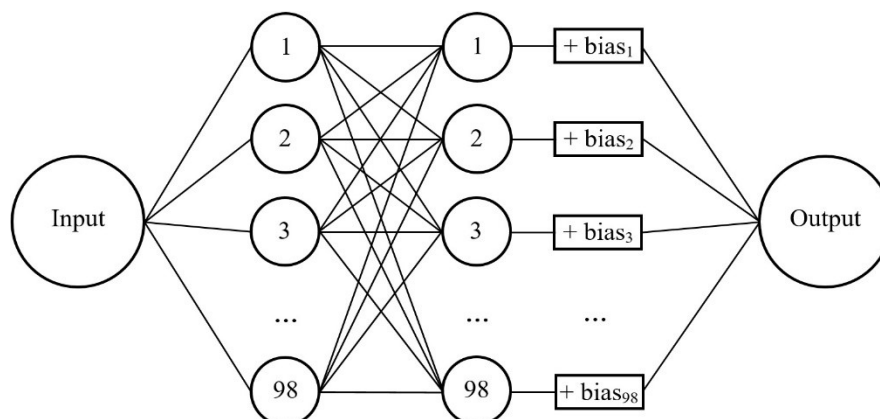


Рисунок 3 – Архитектура ANN для решения системы дифференциальных уравнений динамического межотраслевого баланса с использованием весов смещения

Построим обучение нейронной сети следующим образом: инициализируем нулями и «заморозим» (запретим изменение при обучении) все веса нейронной сети, кроме весов смещения. Все параметры оставим теми же, за исключением начального значения скорости обучения (learning rate): его изменим с 0,001 на 10 000 000 для ускорения обучения. По прошествии 638 эпох обучения получили следующий результат: «замороженные» веса ожидаемо остались равными нулю, а вот веса смещения практически ничем не отличаются от ожидаемого на выходе вектора. С точки зрения метрик качества на обучении данное решение практически идеально: MRPE нулевая, устойчивость абсолютная (потому что вектор на выходе вообще не зависит от входных данных, так как они умножаются на 0). Но с точки зрения сформулированной практической задачи, полученное решение абсолютно бессмысленно, так как никакую матрицу перераспределения ресурсов получить не удалось (она нулевая). То есть с точки зрения метрик качества решение отличное, однако интерпретировать его в контексте решаемой прикладной задачи невозможно. По этой причине веса смещения не используются, и по этой же причине нет смысла пытаться обучить многослойную нейронную сеть для решения поставленной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Межотраслевой баланс является важным инструментом анализа и прогнозирования экономики, позволяющим выявить потенциальные проблемы и принять меры по их решению. Описание межотраслевого баланса с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений является наиболее адекватным подходом к оцифровке данной модели, а её аналитическое решение позволяет в некоторых случаях строить достаточно точные краткосрочные и среднесрочные прогнозы, однако полученные аналитические решения могут быть уточнены.

Сформулированная в работе соответствующая оптимизационная задача и предложенный нейросетевой метод её решения позволили уточнить аналитическое решение и снизить MRPE с 78,08 до 0,0013 % при среднесрочном 5-летнем прогнозе объёмов валового выпуска по отраслям экономики Российской Федерации на 2016 г. по данным симметричных таблиц «затрат-выпуск» 2011 г. Отметим, что данный результат был получен за 615 итераций полного градиентного спуска (или за 615 эпох обучения в терминологии ANN) при использовании простейшей архитектуры полносвязной однослойной ANN с 98 входами и 98 выходами. Исследование полученного уточнённого решения на устойчивость показало преимущество в среднем в 3,7 раза относительно MRPE по сравнению с лучшими из решений, полученными ANN со стандартной инициализацией весов.

Список источников

1. Байменов, А. М. О некоторых факторах эффективности государственного управления / А. М. Байменов // Государственная служба. – 2020. – № 22 (1 (123)). – С. 26–32.
2. Bašić, D. Adaptability of securitization model to conditions of volatile financial structure / D. Bašić, P. Ćurić, // Economics. – 2021. – № 9 (1). – P. 205–219.
3. Ganic, M. Are determinants of international financial integration in the European transition countries different from post-transition countries? / M. Ganic // SSRN Electronic Journal. – 2020. – URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3725386 (дата обращения: 24.03.2026).
4. Grigoryev, L. M. China's capital formation in the volatile time / L. M. Grigoryev, D. Zharonkina // BRICS Journal of Economics. – 2023. – № 4 (2). – P. 265–283.
5. Gusev, V. B. Binary model of restructuring the technology complex of economy / V. B. Gusev // SUMMA: 4th International conference on control systems, mathematical modeling, automation and energy efficiency, Lipetsk, Russian Federation, November 09–11, 2022. – IEEE, 2022. – pp. 13–17.
6. Немчинов, В. С. Общественная стоимость и плановая цена / В. С. Немчинов. – Москва : Наука, 1970. – 506 с.

7. Торопцев, Е. Л., Кандохова, М. М., Гудиева, Н. Г. Дифференциальные уравнения межотраслевого баланса: оцифровка и перспективы применения // Экономическая наука современной России. – 2024. – № 1 (104). – С. 7–22.
8. Ganić, M. Financial globalization in the emerging Balkans: exploring financial trends on the eve of EU membership / M. Ganić. – Cham, Switzerland: Springer nature, 2021. – 151 p.
9. Ristic, K. Meta analyses and controversy about financialization, growth and stability: a look from post-transition countries of last decade / K. Ristic // Economics. – 2020. – № 8 (1). – P. 41–49.
10. Rusek, A. Financial integration and the new EU member countries: challenges and dilemmas // Prague economic papers. – 2005. – № 14 (1). – P. 17–32.
11. Voslensky, M. Nomenklatura: the soviet ruling class / M. Voslensky. – New York City, United States: Doubleday, 1984. – 455 p.
12. Юцис, А. Э. Проблемы стратегии устойчивого развития предприятий обрабатывающей промышленности // Научные исследования и разработки. Экономика. – 2021. – № 9 (3). – С. 33–36.
13. Zhang, Z. The singular value decomposition, applications and beyond / Z. Zhang // arXiv. – 2015. – URL: <https://arxiv.org/abs/1510.08532> (дата обращения: 24.03.2026).
14. Базовые таблицы «затраты-выпуск» за 2011 год в номенклатуре базовых таблиц за 2016 год // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts> (дата обращения: 24.03.2026).
15. Базовые таблицы «затраты-выпуск» за 2016 год // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts> (дата обращения: 24.03.2026).
16. PyTorch // The Linux Foundation. – URL: <https://pytorch.org/> (дата обращения: 24.03.2026).
17. Diederik, P. K., Jimmy, B. Adam: a method for stochastic optimization / P. K. Diederik, B. Jimmy // arXiv. – 2014. – URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (дата обращения: 24.03.2026).
18. ReduceLROnPlateau // PyTorch documentation. – URL: https://docs.pytorch.org/docs/stable/generated/torch.optim.lr_scheduler.ReduceLROnPlateau.html (дата обращения: 24.03.2026).

References

1. Baimenov, A. M. On Some Factors of the Effectiveness of Public Administration. *Public Service*, 2020, no. 22 (1 (123)), pp. 26–32 (In Russ.).
2. Bašić, D., Ćurić, P. Adaptability of securitization model to conditions of volatile financial structure. *Economics*, 2021, no. 9 (1), pp. 205–219.
3. Ganic, M. Are determinants of international financial integration in the European transition countries different from post-transition countries? *SSRN Electronic Journal*, 2020. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3725386 (accessed 24.03.2026).
4. Grigoryev, L. M., Zharonkina, D. China's capital formation in the volatile time. *BRICS Journal of Economics*, 2023, no. 4 (2), pp. 265–283.
5. Gusev, V. B. Binary model of restructuring the technology complex of economy. *SUMMA: 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, Lipetsk, Russian Federation, November 09-11, 2022, Proceedings*. IEEE, 2022, pp. 13–17.
6. Nemchinov, V. S. *Social Cost and Planned Price*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 506 p. (In Russ.).
7. Toroptsev, E. L., Kandokhova, M. M., Gudieva, N. G. Differential equations of intersectoral balance: digitization and application prospects. *Economics of Contemporary Russia*, 2024, no. 1 (104), pp. 7–22 (In Russ.).
8. Ganić, M. *Financial globalization in the emerging Balkans: exploring financial trends on the eve of EU membership*. Cham, Switzerland, Springer nature, 2021. 151 p.
9. Ristic, K. Meta analyses and controversy about financialization, growth and stability: a look from post-transition countries of last decade. *Economics*, 2020, no. 8 (1), pp. 41–49.
10. Rusek, A. Financial integration and the new EU member countries: challenges and dilemmas. *Prague Economic Papers*, 2005, no. 14 (1), pp. 17–32.
11. Voslensky, M. *Nomenklatura: the soviet ruling class*. New York City, United States, Doubleday, 1984. 455 p.
12. Yutsis, A. E. Problems of Sustainable Development Strategy for Manufacturing Enterprises. *Scientific Research and Development. Economics*, 2021, no. 9 (3), pp. 33–36 (In Russ.).
13. Zhang, Z. The singular value decomposition, applications and beyond. *arXiv*, 2015. Available at: <https://arxiv.org/abs/1510.08532> (accessed 24.03.2026).
14. Basic Input-Output tables for 2011 in the nomenclature of basic tables for 2016. *Federal State Statistics Service*. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts> (accessed 24.03.2026) (In Russ.).
15. Basic Input-Output tables for 2016. *Federal State Statistics Service*. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts> (accessed 24.03.2026) (In Russ.).
16. PyTorch. *The Linux Foundation*. Available at: <https://pytorch.org/> (accessed 24.03.2026).
17. Diederik, P. K., Jimmy, B. Adam: a method for stochastic optimization. *arXiv*, 2014. Available at: <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (accessed 24.03.2026).
18. ReduceLROnPlateau. *PyTorch documentation*. Available at: https://docs.pytorch.org/docs/stable/generated/torch.optim.lr_scheduler.ReduceLROnPlateau.html (accessed 24.03.2026).

Статья поступила в редакцию 21.04.2026; одобрена после рецензирования 14.05.2026; принята к публикации 18.05.2026.

The article was submitted 21.04.2026; approved after reviewing 14.05.2026; accepted for publication 18.05.2026.

УДК 004.001

УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ ПЛАТФОРМЫ СТЬЮАРТА
НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

Мирошников Николай Александрович, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
магистрант, ORCID: 0009-0008-2606-5941, e-mail: miroshnikov.nikolai.a@gmail.com

Шагннев Олег Булатович, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-2836-619X, e-mail: shagniev_ob @spbstu.ru

В работе рассматривается задача разработки математической модели и алгоритма управления шестистепенной платформой Стюарта, установленной на подвижном основании, с целью компенсации морской качки и стабилизации положения верхней платформы. В отличие от существующих подходов, предложенная модель учитывает двустороннее динамическое взаимодействие между платформой и судном. Разработана кинематическая и динамическая модель системы, включающая описание движения в нескольких системах координат и учёт сил, создаваемых гидростатическими цилиндрами. Синтезирована система управления на основе ПД-регуляторов. Реализована имитационная модель в среде MATLAB/Simulink. Результаты численного моделирования показали эффективность предложенного подхода при компенсации вертикальных и угловых колебаний основания и обеспечении высокой точности стабилизации.

Ключевые слова: платформа Стюарта, морская качка, подвижное основание, система управления, стабилизация, математическая модель

CONTROL OF STEWART PLATFORM ORIENTATION ON A MOVING BASE

Miroshnikov Nikolai A., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29B Politekhnikeskaya St., Akademicheskoy Municipal District, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation,
Master's student, ORCID: 0009-0008-2606-5941, e-mail: miroshnikov.nikolai.a@gmail.com

Shagniev Oleg B., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29B Politekhnikeskaya St., Akademicheskoy Municipal District, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-2836-619X, email: shagniev_ob @spbstu.ru

This paper addresses the development of a mathematical model and control algorithm for a six-degree-of-freedom Stewart platform mounted on a moving base, aiming to compensate for sea waves and stabilize the upper platform's position. Unlike existing approaches, the proposed model accounts for the bilateral dynamic interaction between the platform and the vessel. A kinematic and dynamic model of the system is developed, including the description of motion in multiple coordinate frames and the consideration of forces generated by hydraulic cylinders. A control system based on PD controllers is synthesized. A simulation model is implemented in the MATLAB/Simulink environment. The results of numerical simulation demonstrate the effectiveness of the proposed approach in compensating for vertical and angular oscillations of the base while ensuring high positioning accuracy.

Keywords: Stewart platform, sea waves, moving base, control system, stabilization, mathematical model

ВВЕДЕНИЕ

В задачах морской техники и робототехнических систем актуальной является проблема стабилизации объектов, размещённых на подвижных основаниях. Воздействие морской качки вызывает значительные отклонения положения и ориентации оборудования, что затрудняет выполнение технологических операций и снижает безопасность эксплуатации.

Одним из перспективных решений является применение платформы Стюарта – пространственного механизма с шестью степенями свободы, обеспечивающего точное позиционирование и ориентацию в пространстве. Такие системы широко используются в задачах компенсации качки, стабилизации оборудования, а также при создании морских робототехнических комплексов.

Анализ существующих исследований показывает, что большинство работ рассматривают платформу Стюарта как изолированную систему. Однако в реальных условиях силы, создаваемые исполнительными механизмами, оказывают влияние на динамику основания, что приводит к изменению характеристик качки. Следовательно, требуется разработка моделей, учитывающих двустороннее взаимодействие платформы и судна.

Целью работы является разработка математической модели и алгоритма управления платформой Стюарта на подвижном основании с учётом динамического взаимодействия с судном.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования является система «платформа Стюарта – судно», включающая верхнюю платформу, исполнительные механизмы, подвижное основание и систему управления.

Положение платформы задаётся вектором обобщённых координат [1–2]:

$$q = (x, y, z, \varphi, \theta, \psi),$$

где x, y, z – координаты центра масс; φ, θ, ψ – углы ориентации.

Основная задача управления формулируется как обеспечение заданного движения

$$q(t) \rightarrow q_{ref}(t).$$

в условиях внешних возмущений, обусловленных перемещением судна.

При этом необходимо учитывать кинематику и динамику системы, ограничения приводов и влияние платформы на основание.

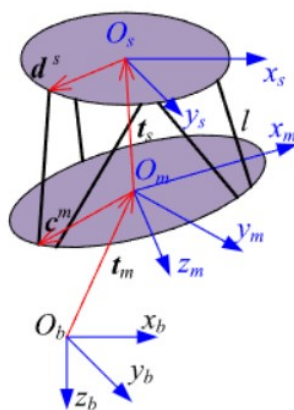


Рисунок 1 – Система координат

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Кинематика платформы

Для описания движения системы «платформа – основание» вводятся три системы координат:

- инерциальная;
- связанная с судном;
- связанная с платформой.

Вектор обобщённых координат представляется в виде [3]

$$q = [q_s; q_b], \quad (1)$$

где q_b – движение судна;

q_s – относительное движение платформы.

Абсолютное положение платформы:

$$r = t_m + R_{bm} t_s, \quad (2)$$

где r – радиус-вектор центра платформы;

R_{bm} и R_{ms} – матрицы поворота;

t_s, t_b – радиус-векторы из инерционной системы координат в систему координат судна и из системы координат судна в систему координат платформы.

Ориентация:

$$R = R_{bm} R_{ms}. \quad (3)$$

Длина i -го гидроцилиндра:

$$l_i = |t_s + R_{ms} d_i^s - c_i^m|, \quad (4)$$

где c_i^m – точки крепления ног на судне;

d_i^s – точки крепления ног на платформе.

Таким образом, в отличие от классической модели, геометрия определяется в системе судна, а движение – относительно подвижного основания.

ДИНАМИКА ПЛАТФОРМЫ

Динамика системы описывается уравнением [3]

$$M_{s(q_s)\ddot{q}_s} + C_{s(q_s,\dot{q}_s)} + G_s + M_{b(q_b)\ddot{q}_b} + C_{b(q_b,\dot{q}_b)} = J^T F \quad (5)$$

где M – матрицы масс,

C – матрица кориолисовых сил;

G – вектор гравитационных сил;

J – матрица Якоби;

F – силы реакции в ногах, где учитывается влияние движения судна на платформу.

Ключевым является учёт обратного воздействия платформы на судно. Для крена судна получаем:

$$J_x \ddot{\phi}_b + b \dot{\phi}_b + mg|GM|\phi_b = M_{wave} + \sum (r_i \times F_i) \quad (6)$$

где J_x – момент инерции судна;

$|GM|$ – метацентрическая высота;

M – масса платформы;

M_{wave} – момент, создаваемый волной по крену,

r_i – радиус-вектор ног платформы,

b – коэффициент демпфирования.

Для простоты будем считать, что судно качается по небольшому углу, поэтому $\sin\{\phi\} = \phi$.

Для нахождения M_w возьмём заданное угловое движение судна по крену ϕ_w в уравнение для крена, без учёта дополнительных моментов, создаваемых ногами. Тогда это уравнение для M_w будет иметь следующий вид:

$$J_x \ddot{\phi}_w + b \dot{\phi}_w + mg|GM|\phi_w = M_w. \quad (7)$$

Тогда получим итоговое решение для нахождения реального угла крена судна при учёте пере-регулирования за счёт сил реакции ног платформы на судно:

$$\begin{aligned} J_x \ddot{\phi}_b + b \dot{\phi}_b + mg|GM|\sin\phi_b = \\ = J_x \ddot{\phi}_w + b \dot{\phi}_w + mg|GM|\phi_w + \sum_{n=1}^6 \{(r_n \times F_n)_x\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Структурная схема системы «платформа – основание» представлена на рисунке 3.

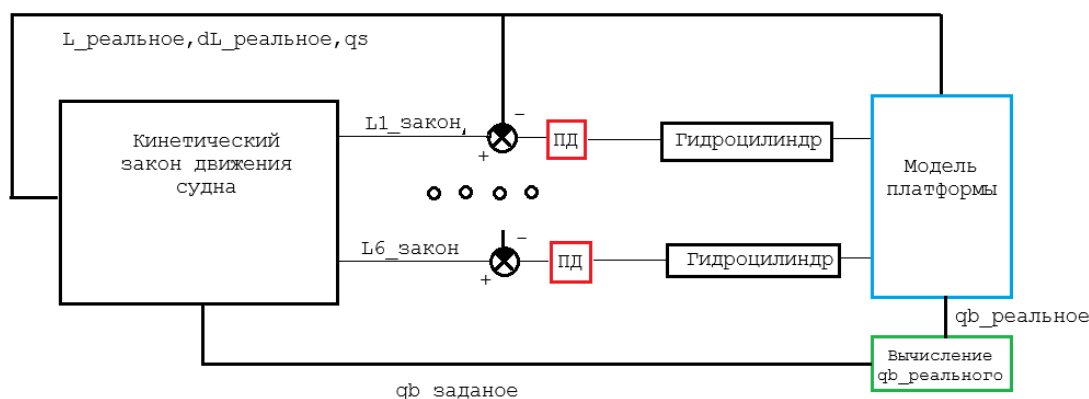


Рисунок 2 – Структурная схема системы «платформа – основание»

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Система управления имеет двухуровневую структуру:

1. Управление положением платформы.

Для управления длиной ног формируется сигнал с помощью ПД-регулятора.

$$u = K_p(q_{ref} - q) + K_d(\dot{q}_{ref} - \dot{q}), \quad (9)$$

где K_p – периодическое звено;

K_d – дифференциальное звено.

На рисунке 4 представлена Simulink-схема системы управления платформой.

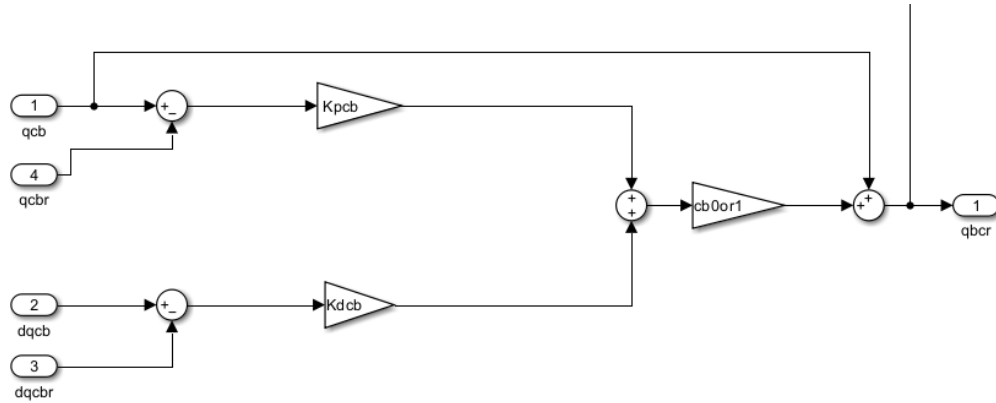


Рисунок 3 – ПД-регулятор положения платформы

2. Управление приводами.

Вычисление расхода жидкости внутри гидроцилиндра вычисляется по формуле [5]:

$$Q_i = Kp(l_i^{ref} - l_i) + Kd(\dot{l}_i^{ref} - \dot{l}_i), \quad (10)$$

где Q_i – расход жидкости для i -й ноги.

На рисунке 4 представлена Simulink-схема системы управления гидроцилиндрами.

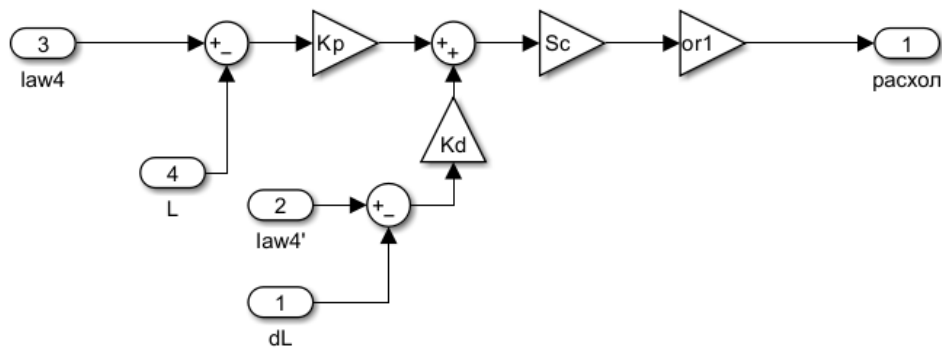


Рисунок 4 – ПД-регулятор гидроцилиндров

МОДЕЛЬ ГИДРОПРИВОДА

Начальный объём обозначим как w_1 [м³], установившийся объём – как w_2 [м³], а за Δw – изменение объёма:

$$w_1 = w_1 + \Delta w. \quad (11)$$

Продифференцировав уравнение, получим

$$q_n = q_2 + \frac{d\Delta w}{dt}, \quad (12)$$

где q_n – расход насоса.

Преобразуем уравнение: $q_2 = Sl$, где S – площадь поршня. $\frac{d\Delta w}{dt} = \frac{w}{k} \frac{dP}{dt}$, где w – объём, занимаемый жидкостью (принимая за const); P – давление в цилиндре; k – коэффициент жёсткости.

Тогда можно найти производную по времени $\dot{P}$:

$$\dot{P} = \frac{k}{w} (q_n - Sl). \quad (13)$$

Сила может быть записана в виде

$$F = SP. \quad (14)$$

Модель учитывает сжимаемость жидкости, ограничения расхода и вязкое трение. Simulink-схема модели гидроцилиндра представлена на рисунке 6.

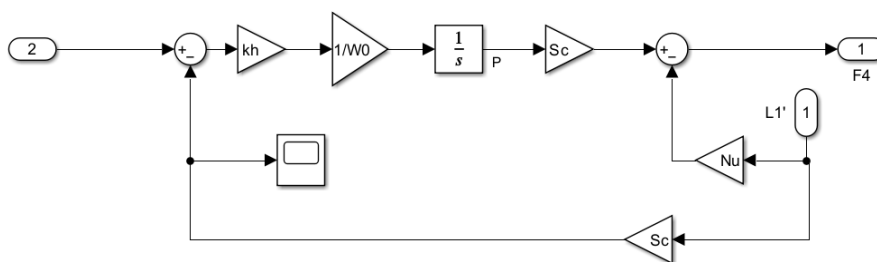


Рисунок 5 – Модель гидроцилиндра

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование проводилось в системе MATLAB/Simulink.

Рассмотрены различные режимы движения судна:

- вертикальные колебания;
- угловая качка;
- комбинированные воздействия.

Для примера работы системы зададим законы движения нижней платформы по крену $\varphi_b = A_\varphi * \sin(\omega_0 * t)$ и вертикальной оси $z = A_z * \sin(\omega_0 * t)$, где $A_\varphi = 3$ град, $A_z = 0,3$ м. Также зададим движение верхней платформы. С 0 секунды до 5 платформа поднимает по z на 0,25 метр, а дальше стоит на высоте 2,25 метра в инерционной системе координат. Результаты моделирования приведены на рисунке 7.

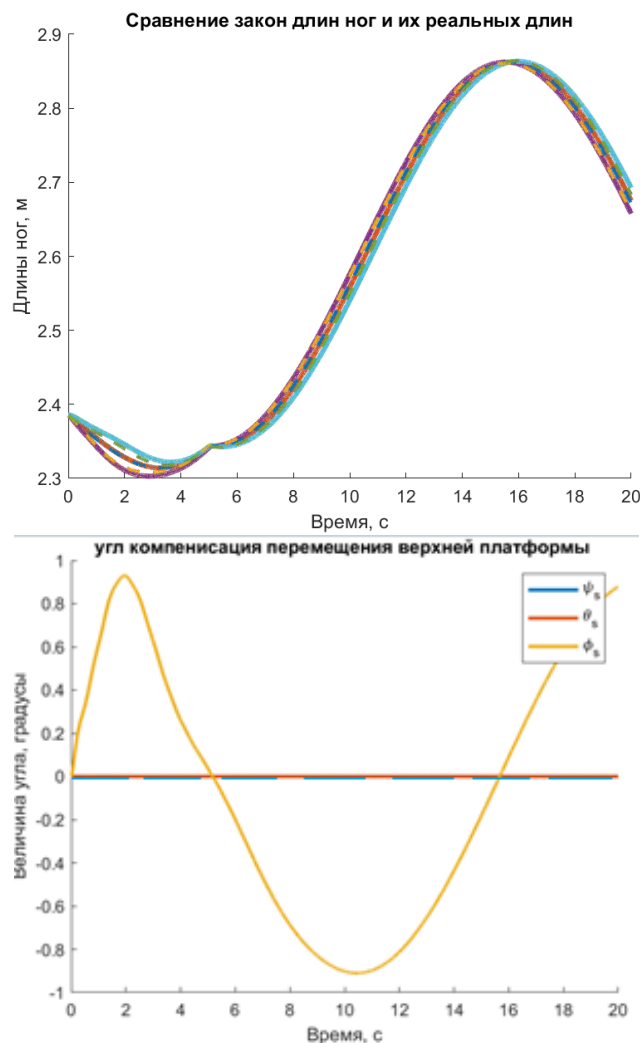


Рисунок 6 – Результаты моделирования

Результаты показали высокую точность стабилизации, эффективную компенсацию качки и устойчивость системы управления. Погрешность слежения составляет не более нескольких процентов. Показано, что учёт динамического взаимодействия влияет на параметры движения судна, что подтверждает необходимость учёта данного эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана математическая модель и алгоритм управления платформой Стюарта на подвижном основании.

Основные результаты:

1. Построена кинематическая и динамическая модель системы.
2. Учтено двустороннее взаимодействие платформы и судна.
3. Разработана система управления.
4. Проведено численное моделирование.

Научная новизна заключается в учёте влияния приводов платформы на динамику основания.

Практическая значимость связана с применением разработанных решений в системах компенсации качки и морских робототехнических комплексах. В качестве дальнейшего развития исследования рассматривается разработка интеллектуальных систем управления платформой в условиях неопределённости [6].

Список источников

1. Андриевский, Б. Р. Динамика платформы Стюарта / Б. Р. Андриевский, Д. Г. Арсеньев, С. А. Зегжда и др. // Вестник СПбГУ. – 2017. – С. 489–495.
2. Зуев, С. М. Моделирование платформы Стюарта : дис. ... канд. техн. наук / С. М. Зуев. – Санкт-Петербург, 2014. – 115 с.
3. Cai, Y. Model analysis and control method of ship-mounted Stewart platforms for wave compensation / Y. Cai, S. Zheng, W. Liu, Z. Qu // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 4505–4517.
4. Мирошников Н. А. Математическое моделирование процессов управления ориентацией платформы Стюарта с шестью гидроцилиндрами / Н. А. Мирошников, О. Б. Шагниев // Неделя науки ФизМех : сборник материалов Всероссийской научной конференции. – 2025. – С. 253–256.
5. Грешняков, П. И. Совершенствование пневматической системы управления платформой Стюарта / П. И. Грешняков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 151–162.
6. Дуюн, И. А. Интеллектуальная система управления платформой стюарта на основе применения метода обучения с подкреплением / И. А. Дуюн, П. С. Кабальянц, Т. А. Дуюн, Л. А. Рыбак // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 11. – С. 102–115.

References

1. Andrievsky, B. R., Arsenyev, D. G., Zegzhda, S. A. et al. Dynamics of Stewart platform. *Bulletin of SPbSU*, 2017, no. 3, pp. 489–495 (In Russ.).
2. Zuev, S. M. *Modeling of a Stewart platform : Cand. Sc. (Eng.) thesis*. Saint Petersburg, 2014. 115 p. (In Russ.).
3. Cai, Y., Zheng, S., Liu, W., Qu, Z. Model analysis and control method of ship-mounted Stewart platforms for wave compensation. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 4505–4517.
4. Miroshnikov, N. A., Shagniev, O. B. Mathematical modeling of orientation control processes for a six-hydraulic-cylinder Stewart platform. *PhysMech Science Week : proceedings of the All-Russian Scientific Conference*, 2025, pp. 253–256 (In Russ.).
5. Greshnyakov, P. I. Improvement of the pneumatic control system for a Stewart platform. *Bulletin of Samara University. Aerospace Engineering, Technologies and Mechanical Engineering*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 151–162 (In Russ.).
6. Duyun, I. A., Kabalyants, P. S., Duyun, T. A., Rybak, L. A. Intelligent control system for a Stewart platform based on reinforcement learning. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2024, no. 11, pp. 102–115 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 29.04.2026; одобрена после рецензирования 14.05.2026; принята к публикации 20.05.2026.

The article was submitted 29.04.2026; approved after reviewing 14.05.2026; accepted for publication 20.05.2026.

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 621.315.626:621.311.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Никифоров Александр Анатольевич, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0009-0004-9195-1537, e-mail: ieei_director@mail.ru

Шаронов Максим Александрович, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, аспирант, ORCID: 0009-0002-5291-7980, e-mail: max.sharonov.97@mail.ru

Порваткин Егор Константинович, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, магистрант, e-mail: egor.porvatkin1@gmail.com

Львов Алексей Арленович, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, доктор технических наук, профессор, ORCID:0000-0003-4270-7867, e-mail: alvova@mail.ru

В данной работе разработаны цифровые двойники в MATLAB/Simulink, предназначенные для комплексного исследования факторов, ухудшающих качество электроэнергии. Моделирование охватывает анализ импульсных переходных процессов при грозовых разрядах, исследование нелинейных нагрузок, вызывающих высшие гармоники и колебания напряжения, а также изучение фликер-эффекта на примере электродуговой печи. Все исследуемые явления реализованы в виде отдельных цифровых имитационных моделей, на основе которых получены и проанализированы экспериментальные данные.

Ключевые слова: качество электроэнергии, цифровой двойник, компьютерное моделирование, MATLAB/Simulink, модель импульса молнии, модель электродуговой печи, фликер

MODELING OF ELECTRIC SUPPLY QUALITY USING DIGITAL TWINS

Nikiforov Alexander A., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0009-0004-9195-1537, e-mail: ieei_director@mail.ru

Sharonov Maksim A., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, graduate student, ORCID: 0009-0002-5291-7980, e-mail: max.sharonov.97@mail.ru

Porvatkin Egor K., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, master's student, e-mail: egor.porvatkin1@gmail.com

Lvov Aleksey A., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-4270-7867, e-mail: alvova@mail.ru

This paper presents the development of digital twins in MATLAB/Simulink aimed at comprehensive investigation of factors degrading electric power supply quality. The modeling includes analysis of transient processes caused by lightning strikes, study of nonlinear loads causing higher harmonics and voltage fluctuations, as well as examination of flicker effect using an arc furnace model. Each phenomenon is implemented through separate simulation models based on which experimental results are obtained and analyzed.

Keywords: electric supply quality, digital twin, computer simulation, MATLAB/Simulink, lightning impulse model, arc furnace model, flicker

ВВЕДЕНИЕ

Поддержание надлежащего качества электроэнергии является критически важной задачей в области электроэнергетики. Данная проблема играет первостепенную роль в обеспечении контроля электроэнергии, поставляемой промышленным предприятиям. Развитие интеллектуальных энергосистем дополнительно усиливает значимость вопросов качества электроэнергии. Даже одиночный инцидент, связанный с нарушением качества электроэнергии, например провал напряжения из-за потенциальной неисправности в передающих или распределительных сетях, может привести к существенным экономическим убыткам как для энергоснабжающих компаний, так и для потребителей электроэнергии [1–3].

Нарушения качества электроэнергии классифицируются на провалы напряжения, перенапряжения, переходные процессы, гармонические искажения, кратковременные прерывания напряжения и мерцание. Исследования в области качества электроэнергии представляют собой изучение различных факторов, провоцирующих нарушения качества электроэнергии, и создание методов их устранения. Для формирования эффективной стратегии решения проблем снижения качества электроэнергии необходимо глубокое понимание сущности явлений, вызывающих нарушения качества, и их коренных причин. Прогресс в области вычислительных технологий и программных средств открыл возможности для моделирования источников нарушения качества электроэнергии. Такое моделирование позволяет исследователям создавать цифровые двойники конкретных энергосистем с целью выявления, анализа и понимания основных причин нарушения качества электроэнергии [4]. Кроме того, это даёт возможность исследователям проводить различные сценарии повреждений, варьируя параметры двойника для проверки своих гипотез [5]. Моделирование обеспечивает понимание того, как нарушения качества электроэнергии распространяются от источника по всей энергосистеме. Исходя из этого, применение цифровых двойников для моделирования и симуляции стало одним из наиболее распространённых подходов к исследованию различных возмущений и причин нарушения качества электроэнергии. Существует значительное количество программных инструментов для моделирования энергосистем [6], каждый из которых имеет свои преимущества. В данной работе для создания цифровых двойников выбрана среда MATLAB/Simulink с SimPowerSystems [7–10] и представлен комплексный набор базовых двойников, созданных для симуляции провалов напряжения, перенапряжений, переходных процессов, гармонических искажений и мерцаний при нарушениях качества электроэнергии.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цифровые двойники применяются для симуляции различных возмущений и нарушений качества электроэнергии, а также для наблюдения того, как данные негативные факторы искажают синусоидальную форму сигнала энергосистемы. Двойники содержат минимальное количество блоков с применением стандартных настроек для обеспечения их простоты и воспроизводимости. Разработанные модели, описанные в данной работе, могут функционировать в качестве основных «строительных блоков» для более сложных энергосистем. Уровень напряжения, применяемый в моделях, основан на параметрах, характерных для стандартных отечественных энергосистем.

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ИМПУЛЬСА МОЛНИИ

Цифровой двойник импульса молнии представлен на рисунке 1. Он моделирует импульсный переходной процесс, возникающего при разряде молнии в непосредственной близости от линии электропередачи. Двойник включает в себя блок, определяющий работу трёхфазного источника с характеристиками 0,4 кВ, 1 МВА, 50 Гц, питающего резистивную нагрузку мощностью 10 кВт и индуктивную нагрузку мощностью 10 кВАр.

Для фиксации мгновенных форм сигналов на шинах напряжением 0,4 кВ установлены измерительные устройства, отображающие действующее значение (ДЗ) сигнала. Блок управления молнией подсоединён к фидерной линии для генерации импульсных переходных процессов. Поскольку в стандартной библиотеке блоков MATLAB/Simulink отсутствует блок молнии, он может быть создан с использованием имеющихся блоков Simulink [9, 10].

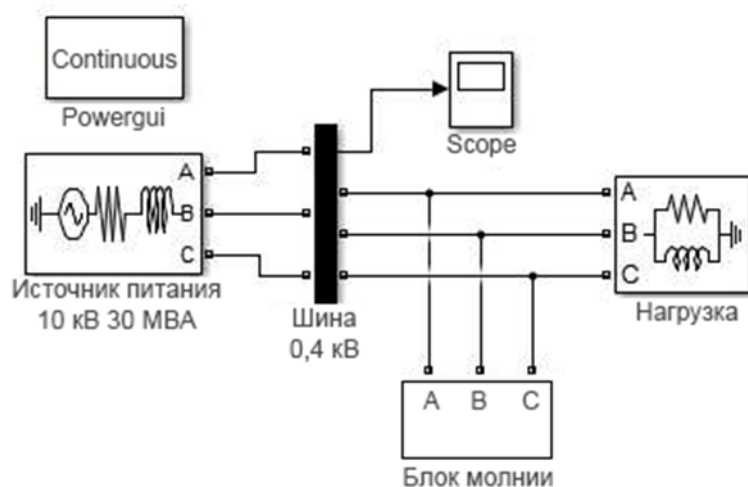


Рисунок 1 – Модель переходного процесса при импульсном воздействии молнии

В трёхфазной системе необходимо реализовать три независимых канала, каждый из которых содержит управляемый источник напряжения, резисторы и катушки индуктивности. Форма импульса молнии, воздействующего на управляемый источник, задаётся следующим математическим уравнением [11, 17]:

$$v(t) = A \exp(-\alpha|t - t_s|) \cdot u(t - t_s), \quad (1)$$

где A – амплитуда импульса;

α – коэффициент затухания;

t_s – время начала импульса;

t – текущий момент времени;

$u(\tau)$ – ступенчатая функция скачка напряжения.

Модель импульса молнии (рис. 2) реализована с использованием функциональных блоков MATLAB, таких как function, ramp, constant, а также stepfunction. Блок ramp применяется как временная функция t , блок constant – для амплитуды импульса A и времени начала импульса t_1 и, наконец, блок stepfunction u – для задания скачка сигнала [12].

Стандартная характеристика импульса молнии 1,2/50 мкс, при которой импульс достигает максимального значения за 1,2 мкс и затухает до 50 % в течение последующих 50 мкс, определена стандартами IEEE 1159.1 2009 и IEEE C62-41.2 2002 [18]. На графике рисунка 3 показана модельная форма сигнала импульса молнии 1,2/50 мкс, вычисленная по уравнению 1 с коэффициентом затухания $\alpha = 14,000$ в функциональном блоке MATLAB.

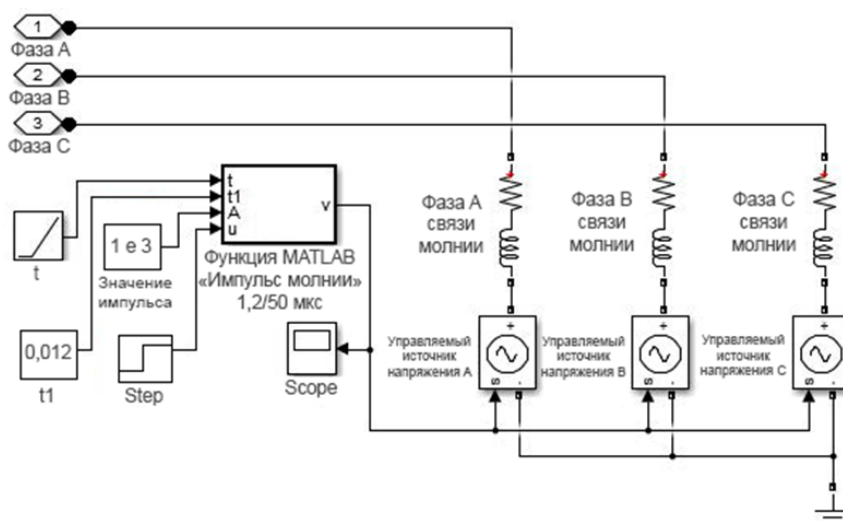


Рисунок 2 – Цифровой двойник действия молнии

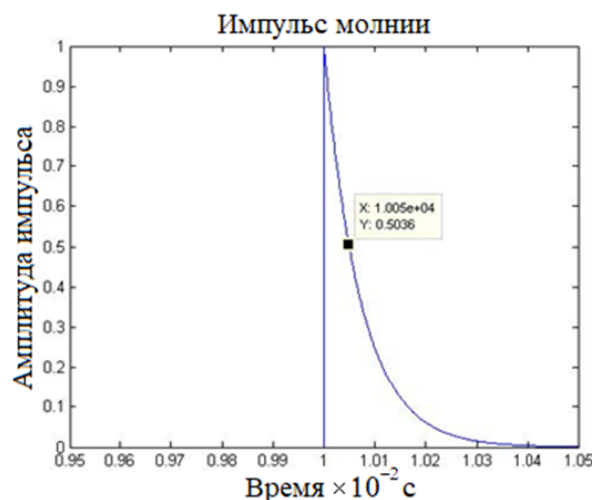


Рисунок 3 – Форма импульса молнии продолжительностью 1,2/50 мкс

Форма сигнала фиксируется с помощью прибора MATLAB scope с частотой дискретизации 1 МГц, что соответствует 1 мкс на один отсчёт сигнала. Для отсчёта с номером 10000, который соответствует моменту времени 0,01 с, амплитуда импульса достигает пикового значения 1, а для отсчёта с номером 10500, который взят через 50 мкс, амплитуда импульса уменьшается до 0,5036. Это подтверждает, что данная модель очень близко соответствует характеристике импульса молнии 1,2/50 мкс, определённой в стандартах.

Продолжительность моделирования составляет 0,04 секунды. Оценка параметров получающихся гармоник сигналов тока и напряжения проводилась методами, описанными в работах [19–26]. Амплитуда импульса установлена на уровне 1 кВ, начинается через 0,012 с, а напряжение сети связано установлено на уровне 10 Ом и 1 мкГн. На графике рисунка 4 показана смоделированная импульсная переходная форма сигнала для всех трёх фаз. Полное сопротивление соединительной сети определяет, насколько близко разряд молнии расположен к линии электропередачи, что, в свою очередь, определяет величину импульсной переходной формы сигнала. Чем меньше сопротивление соединительной сети, тем ближе молния к линии электропередачи.

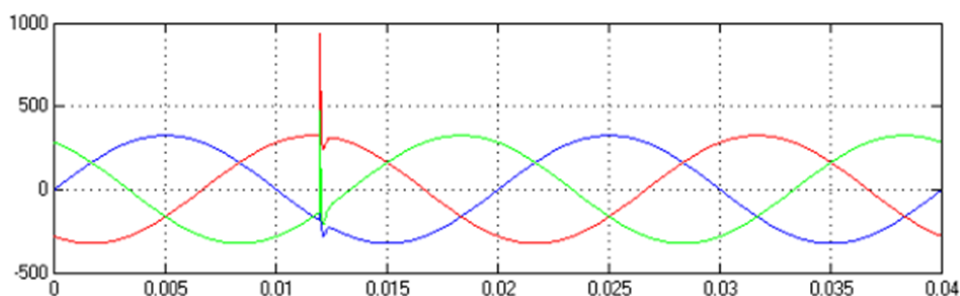


Рисунок 4 – Импульсный переходный процесс, вызванный молнией вблизи линии электропередачи напряжением 0,4 кВ

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ОДНОФАЗНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ

Цифровой двойник однофазной нелинейной системы представлен на рисунке 5. Он применяется для симуляции возмущения тремя гармониками напряжения, возникающего в результате работы однофазного мостового выпрямителя с фильтрующим конденсатором, который часто встречается в жилых и коммерческих зданиях [27]. Двойник включает трёхфазный источник напряжения (10 кВ, 30 МВА, 50 Гц), подающий напряжение через трансформатор типа «треугольник – звезда» (10 кВ/0,4 кВ, 1 МВА) на резистивную нагрузку 1 МВт, однофазный мост с ёмкостным фильтром 2000 мкФ и резистивную нагрузку 10 Ом для каждой фазы. На шинах 10 и 0,4 кВ размещены измерители мгновенного ДЗ сигнала. Время моделирования установлено на 0,1 с. Оценка параметров получающихся гармоник сигналов тока и напряжения проводилась методами, описанными в работах [19–26]. На графике рисунка 6 показаны формы гармонических колебаний на шинах 10 и 0,4 кВ. Гармонические искажения на шине 0,4 кВ остаются заметными на 60° и 240° каждого цикла формы сигнала. Однако на шине 10 кВ гармонические искажения были существенно подавлены трансформатором типа «треугольник – звезда».

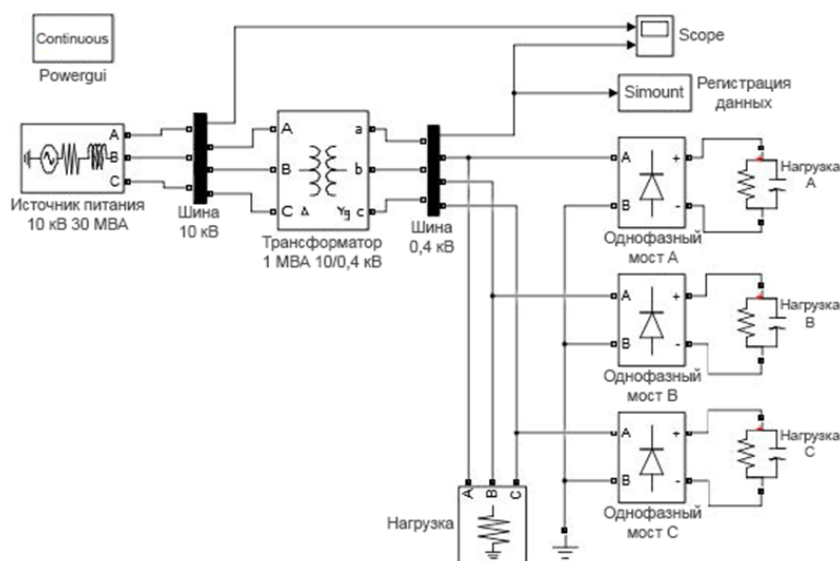


Рисунок 5 – Цифровой двойник однофазной нелинейной системы

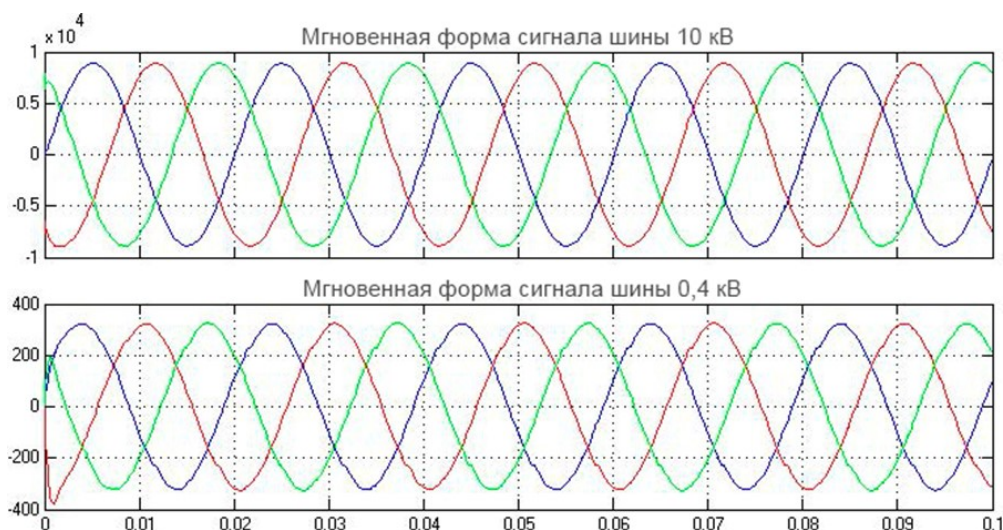


Рисунок 6 – Сигналы гармонических искажений при работе цифрового двойника

При анализе гармонических искажений было выбрано время моделирования 0,2 с, что соответствует 10 полным циклам сигнала. Такой временной интервал соответствует стандартному размеру измерительного окна согласно требованиям международного стандарта IEC 61000-4-7 и межгосударственного стандарта ГОСТ 30804.4.7-2013. Анализ гармонического спектра до 2000 Гц выполнялся с использованием блока powergui в среде Simulink [13–17].

Результаты моделирования, представленные на рисунке 7, демонстрируют следующие особенности:

- в сети 0,4 кВ фаза А характеризуется значительным содержанием нечётных гармоник, с особенно выраженной гармоникой нулевой последовательности 3-го порядка, что типично для тройных гармоник, создаваемых однофазными нелинейными нагрузками;
- при переходе на уровень напряжения 10 кВ наблюдается практически полное подавление всех тройных гармоник (3-го, 9-го, 15-го и 21-го порядков), что объясняется применением трансформатора с соединением обмоток по схеме «треугольник – звезда».

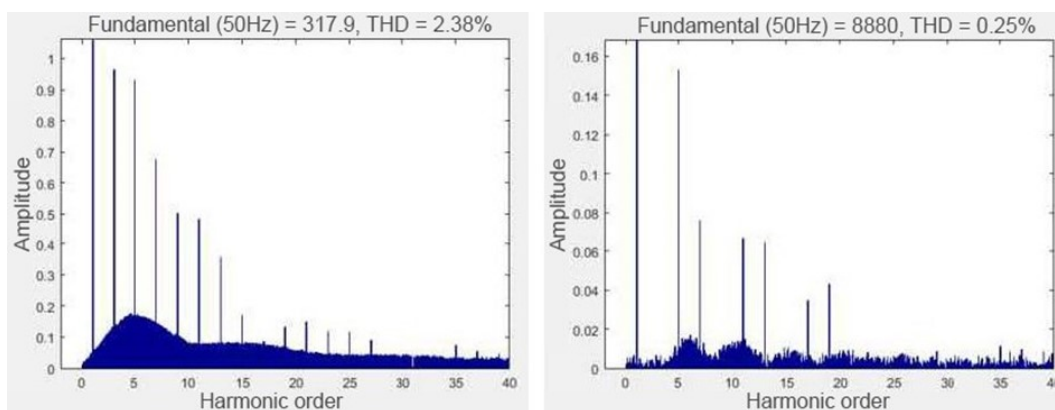


Рисунок 7 – Частотный анализ гармонических искажений фазы А на шинах

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ТРЁХФАЗНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ

Цифровой двойник трёхфазной нелинейной схемы изображён на рисунке 8. Двойник позволяет исследовать процесс резкого изменения напряжения и возникающих гармонических искажений. Такие эффекты скачков напряжения характерны для шести импульсных трёхфазных выпрямителей [27, 28]. В состав двойника входят трёхфазный источник питания (10 кВ, 30 МВА, 50 Гц), понижающий трансформатор типа «треугольник – звезда» (10 кВ/0,4 кВ, 1 МВА) и 6-импульсный управляемый выпрямитель, подключённый к резистивной (600 В, 10 кВт и 400 В, 10 кВт) и индуктивной (1 кВА) нагрузкам. Система управления включает блок MATLAB PLL для фазовой синхронизации, блок MATLAB PulseGenerator для формирования управляющих импульсов и блок SimulinkConstant для установки угла срабатывания выпрямителя. Результаты моделирования демонстрируют значительные скачки напряжения на шине 0,4 кВ при угле управления 30° (рис. 9), которые существенно

ослабляются после трансформатора на стороне 10 кВ, а также вызывают заметные искажения синусоидальной формы напряжения. Гармонический анализ с использованием блока powergui (настройки: до 2000 Гц, интервал 10 циклов) выявил в фазе А на шине 0,4 кВ характерные гармоники 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 и 37 порядков (рис. 10), что соответствует гармоническому сводному закону [29]:

$$H_0 = nq \pm 1, \quad (2)$$

где H_0 – порядок гармоник;

n – натуральное число;

q – номер импульса преобразователя.

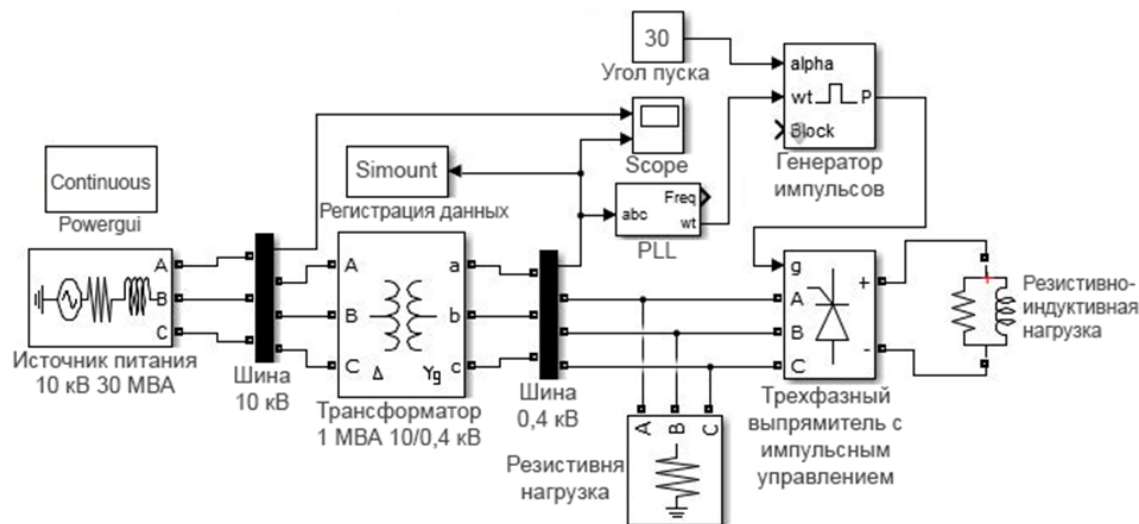


Рисунок 8 – Цифровой двойник трёхфазной нелинейной схемы

Когда сигнал распространяется вверх по направлению к 10 кВ, можно ясно видеть, что все эти гармонические составляющие были подавлены высоким порядком гармоник источника напряжением 10 кВ, но все ещё сохраняются.

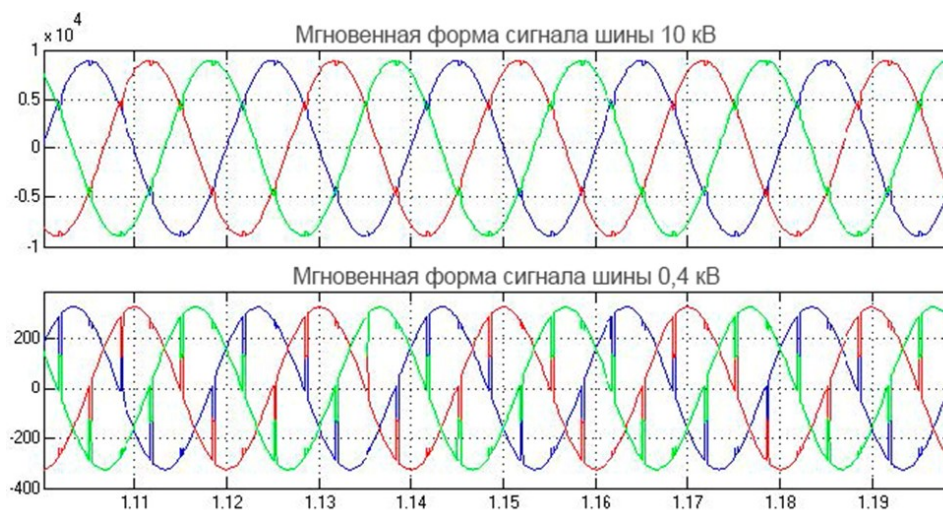


Рисунок 9 – Изменение напряжения на шинах 10 кВ и 0,4 кВ

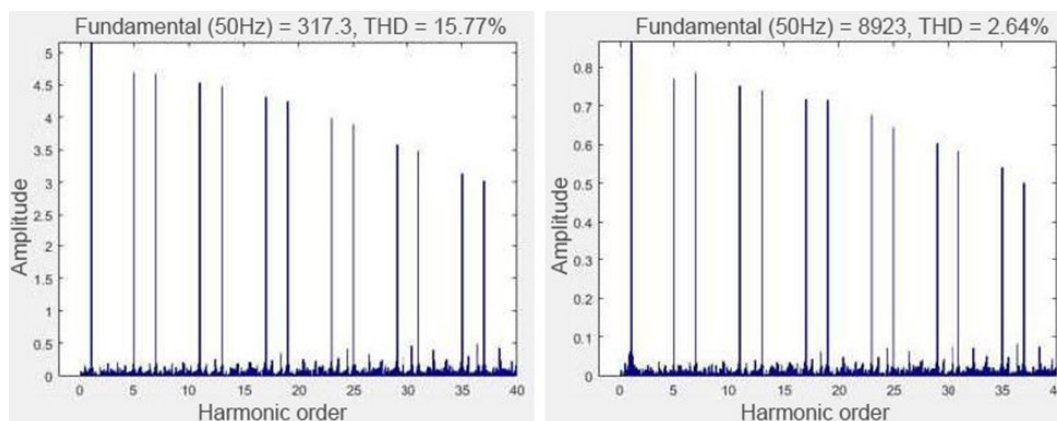


Рисунок 10 – Гармонический анализ скачков напряжения фазы А

Расположение и глубина провала напряжения зависят от настройки угла срабатывания трёх-фазного выпрямителя, а ширина провала напряжения определяется индуктивной нагрузкой. Чем больше индуктивная нагрузка, тем шире провал напряжения. Скачки напряжения обычно не распространяются вверх по сети, поскольку они подавляются фидерной линией и трансформатором.

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА МЕРЦАНИЯ

Цифровой двойник эффекта мерцания представлен на рисунке 11. Двойник представляет собой сложную систему из цифрового двойника силовой части электродуговой печи и трёхфазного источника питания. Для проведения мониторинга к шине 0,4 кВ подключён измерительный блок. Цифровой двойник силовой части электродуговой печи был реализован как отдельный компонент в среде Simulink (рис. 12). Цифровой двойник силовой части электродуговой печи включает три идентичных набора управляемых источников напряжения с резистивно-индуктивными цепями (по одному на каждую фазу), передающих фликер-возмущения в электрическую сеть. В основе модели лежит гиперболическая аппроксимация дугового разряда [30, 31] (формула (3)):

$$v(t) = \left(V_{ac} + \frac{P}{D + |i|} \right) \cdot \text{sign}(i), \quad (3)$$

где V_{ac} – пороговое напряжение дуги;

i – фазовый ток;

P – мощность дуги;

D – ток дуги;

$\text{sign}(i)$ – функция определения знака аргумента.

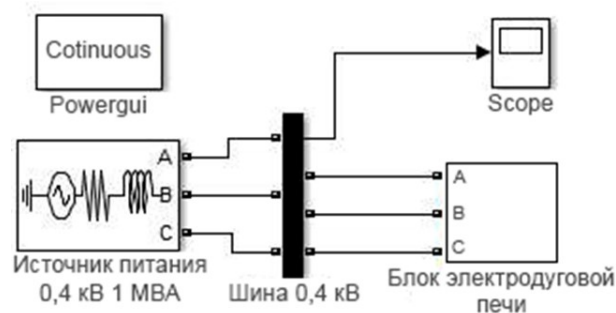


Рисунок 11 – Цифровой двойник эффекта мерцания

Частота мерцания определяется по формуле (4):

$$V_{ac}(t) = V_{\alpha_0} [1 + m \sin(\omega_f t)], \quad (4)$$

где V_{α_0} – базовое опорное напряжение при отсутствии активности дуги;

m – индекс модуляции;

ω_f – круговая частота мерцания.

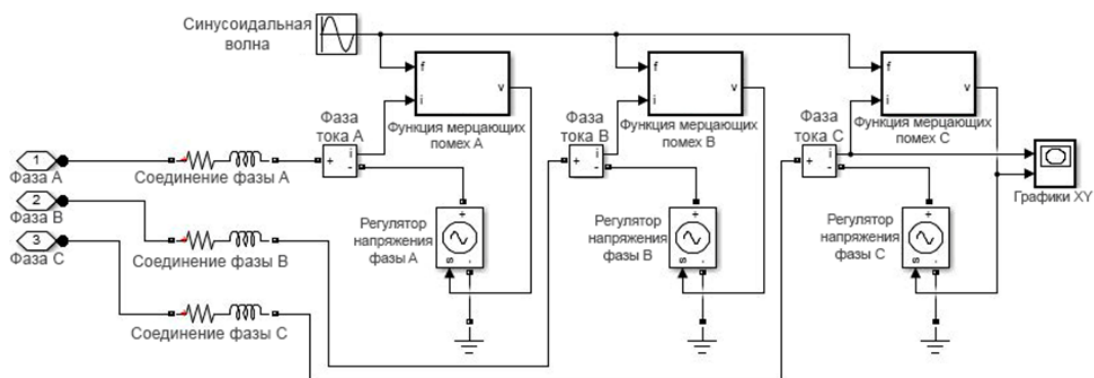


Рисунок 12 – Цифровой двойник силовой части электродуговой печи

В двойнике были заданы следующие параметры дугового разряда: мощность 19 кВт, ток 5 кА, пороговое напряжение 200 В, индекс модуляции 0,2, а также параметры сети связи – сопротивление 0,01 Ом и индуктивность 1 мГн. Моделирование проводилось в течение 0,04 с. Анализ гармонического состава токов и напряжений выполнялся согласно методикам, представленным в исследованиях [19–26]. Как видно из графика на рисунке 13, мгновенные значения напряжения на шине 0,4 кВ демонстрируют характерные фликер-возмущения во всех трёх фазах.

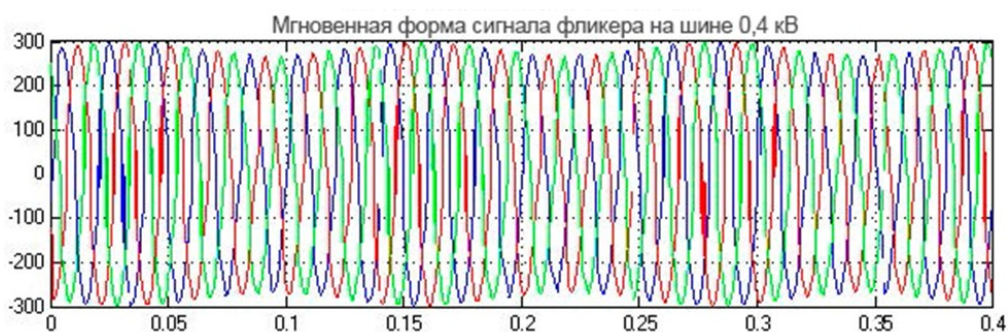


Рисунок 13 – Возмущение формы сигнала эффекта мерцания, вызванное электродуговой печью на шине 0,4 кВ

Характерные искажения синусоидальной формы сигнала, вызванные фликер-эффектами, приводят к возникновению гармонических составляющих. Для их детального исследования применяется блок Simulinkpowergui, настроенный на анализ частотного спектра до 2000 Гц с использованием 10-циклового временного окна, начиная с 0,1 секунды. Результаты анализа, представленные на рисунке 14, показывают значительное содержание нечётных гармоник (3-й, 5-й, 7-й, 9-й, 11-й и 13-й порядков) в фазе А при напряжении 0,4 кВ, причём наиболее выраженной является гармоника третьего порядка.

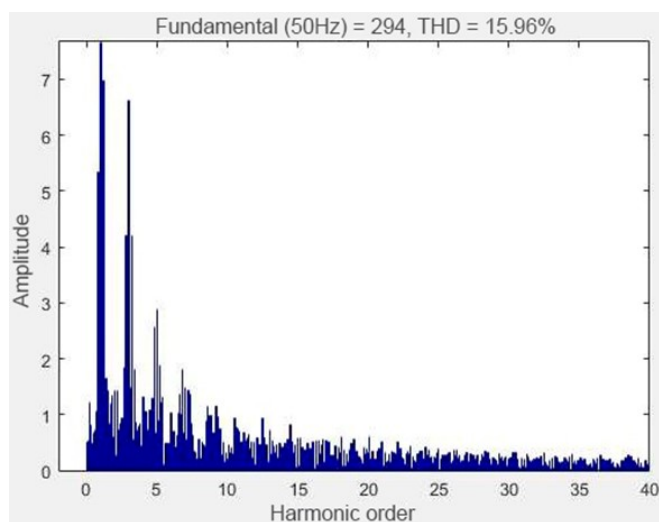


Рисунок 14 – Формы сигнала эффекта мерцания на фазе А

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход даёт возможность детально изучать механизмы распространения и проявления различных нарушений в электрических сетях.

В рамках исследования разработан комплекс цифровых двойников, охватывающих основные виды нарушений качества электроэнергии: провалы напряжения при авариях, импульсные переходные процессы, гармонические искажения, кратковременные перерывы электроснабжения и фликер-эффекты. Эти цифровые двойники служат как фундаментальной основой для научных исследований в области качества электроэнергии, так и ценным учебным материалом для образовательных программ по данной тематике.

Список источников

- McGranaghan, M. F. Economic Evaluation of Power Quality / M. F. McGranaghan, B. Roettger // IEEE Power Engineering Review. – 2003. – Vol. 22, № 2. – P. 8–12.
- Буре, И. Г. Влияние современного оборудования жилых и офисных комплексов на качество электроэнергии / И. Г. Буре, И. М. Хевсуриани, М. Н. Киселев, А. Ю. Козырьков // Энергетик. – 2017. – № 1. – С. 42–46.
- Львова, Е. В. Исследование цифровых методов измерения активной и реактивной мощности в силовых сетях / Е. В. Львова, А. А. Никифоров, М. А. Шаронов, М. Ф. Степанов // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках, 2023. – № 4. – URL: mathmod.esrae.ru/44-186 (дата обращения: 21.01.2025).
- McGranaghan, M. F. Challenges and Trends in Analyses of Electric Power Quality Measurement Data / M. F. McGranaghan, S. Santoso // EURASIP J. on Advances in Signal Processing. – 2007. – <https://doi.org/10.1155/2007/57985>.
- McEachern, A. A Free Simulator Program for Teaching Power Quality Concepts / A. McEachern // Proc. of the 9th Int. Conf. on Electrical Power Quality and Utilisation. – Barcelona, Spain, 2007. – P. 1–4. – DOI 10.1109/EPQU.2007.4424112.
- Bam, L. Review: Power System Analysis Software Tools / L. Bam, W. Jewell // IEEE Power Engineering Society General Meeting. – San Francisco, USA, 2005. – Vol. 1. – P. 139–144. DOI: 10.1109/PES.2005.1489097.
- Patne, N. R. Stochastic Estimation of Voltage Sag Due to Faults in the Power System by Using PSCAD/EMTDC Software as a Tool for Simulation / N. R. Patne, K. L. Thakre // J. of Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. – Vol. 13, № 2. – P. 59–63.
- Validation of Voltage Sag Simulation Tools: ATP and Short Circuit Calculation Versus Field Measurements / J. M. C. Filho, R. C. Leborgne, J. P. G. Abreu et al. // IEEE Trans. on Power Delivery, 2008. – Vol. 23, № 3. – P. 1472–1480. – DOI 10.1109/TPWRD.2008.916752.
- Hadi, S. Power System Analysis, 3rd edn. / S. Hadi. – PSA Publishing LLC, 2011. – 772 p.
- Ntombela, M. An Investigation into the Capabilities of MATLAB Power System Toolbox for Small Signal Stability Analysis in Power Systems / M. Ntombela, K. K. Kaberere, K. A. Folly, A. I. Petroianu // Power Engineering Society Inaugural Conf. and Exp. in Africa. – Durban, South Africa: IEEE, 2005. – P. 242–248. – DOI 10.1109/PE-SAFR.2005.1611822.
- Milano, F. An Open Source Power System Analysis Toolbox / F. Milano // IEEE Trans. on Power Systems, 2005. Vol. 20, № 3. – P. 1199–1206. – DOI: 10.1109/TPWRS.2005.851911.
- Vanfretti, L. Application of the PSAT, an Open Source Software for Educational and Research Purposes / L. Vanfretti, F. Milano // IEEE Power Engineering Society General Meeting. – Tampa, USA : IEEE, 2007. – P. 1–7. – DOI 10.1109/PES.2007.385952.
- Sybillе, G. Digital Simulation of Power Systems and Power Electronics using the MATLAB/Simulink Power System Blockset / G. Sybillе, L. H. Hoang // Proc. of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. – Singapore: IEEE, 2000. – Vol. 4. – P. 2973–2981. – DOI: 10.1109/PESW.2000.847358.
- Sybillе, G. Theory and Applications of Power System Blockset, A MATLAB/Simulink-Based Simulation Tool for Power Systems / G. Sybillе, P. Brunelle, L. H. Hoang et al. // Proc. of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. – Singapore: IEEE, 2000. – Vol. 1. – P. 774–779. – DOI: 10.1109/PESW.2000.850165.
- Dessaint, L. A. A Power System Simulation Tool Based on Simulink / L. A. Dessaint, K. Al-Haddad, L. H. Hoang et al. // IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1999. – Vol. 46, № 6. – P. 1252–1254. – DOI 10.1109/41.808019.
- PAT: A Power Analysis Toolbox for MATLAB/Simulink / K. Schoder, A. Hasanovic, A. Feliachi, A. Hasanovic // IEEE Trans. on Power Systems, 2003. – Vol. 18, № 1. – P. 42–47. – DOI 10.1109/TPWRS.2002.807117.
- The Estimation of Lightning Impulses Superimposed onto Pre-Stressed DC Breakdown Voltages Using the Leader Propagation Method / R. Meer, Y. Khan, N. R. Wani, A. Ali Al-Arainy // Energies. – 2022. – Vol. 15. – P. 1708–1719. <https://doi.org/10.3390/en15051708>.
- Discussion on Standard Waveform in the Lightning Impulse Voltage Test / S. Okabe, J. Takami, T. Tsuboi, G. Ueta // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Installation, 2013. – Vol. 20, № 1. – P. 147–156. – DOI 10.1109/TDEI.2013.6451353.
- 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 // Studies in Systems, Decision and Control. – Vol. 337. – Springer Nature Switzerland, 2020. – P. 250–271. – DOI 10.1007/978-3-030-65283-8_21.

20. 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 (APEDE). – Saratov : IEEE, 2016. – P. 361–366. DOI 10.1109/APEDE.2016.7879029.
21. Львова, Е. В. Оптимальное оценивание параметров сигналов в промышленных сетях переменного тока / Е. В. Львова, П. А. Шаронов, М. А. Шаронов // Научно-технический вестник Поволжья, 2023. – № 9. – С. 32–38.
22. Львова, Е. В. Сравнение цифровых алгоритмов измерения активной мощности: обзор методов обработки дискретного сигнала / Е. В. Львова, А. А. Никифоров, О. М. Балабан, М. А. Шаронов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2024. – № 1 (65). – С. 122–135.
23. 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. – DOI 10.18127/j00338486-201908(12)-14.
24. Seranova, A. Comparison of Methods for Parameter Estimating of Superimposed Sinusoids / A. Seranova, R. Ermakov, A. Sytnik et al. // Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 337: Recent Research in Control Engineering and Decision Making. – Springer Nature Switzerland, 2020. – P. 140–151. – DOI 10.1007/978-3-030-65283-8_12.
25. 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 the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia: IEEE, 2016. – P. 1–6. – DOI 10.1109/APEDE.2016.7879042.
26. 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 the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia: IEEE, 2016. – P. 1–6. – DOI 10.1109/APEDE.2016.7879043.
27. Grady, W. M. Understanding Power System Harmonics / W. M. Grady, S. Santoso // IEEE Power Engineering Review. – 2001. – Iss. 11. – P. 8–11.
28. Tang, L. Voltage Notching Interaction Caused by Large Adjustable Speed Drives on Distribution Systems with Low Short Circuit Capacities / L. Tang, M. McGranaghan, R. Ferraro et al. // IEEE Trans. on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, № 3. – P. 1444–1453. – DOI 10.1109/61.517503.
29. Майоров, Б. Г. Модели составных гармонических полувольт и связь дискретизации времени с энтропией временных параметров сигналов / Б. Г. Майоров // Информатика и автоматизация, 2024. – Т. 23, № 3. – С. 831–858. – DOI 10.15622/ia.23.3.7.
30. Bhonsle, D. C. Simulation of Electric Arc Furnace Characteristics for Voltage Flicker Study using MATLAB / D. C. Bhonsle, R. B. Kelkar // Int. Conf. on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering. – Sivakasi, India: 2011. – P. 174–181. – DOI 10.1109/ICONRAEECE.2011.6129773.
31. Golkar, M. A. A Novel Method of Electrical Arc Furnace Modeling for Flicker Study / M. A. Golkar, M. Tavakoli Bina, S. Meschi, K. N. Toosi // Renewable energy & power quality J., 2007. – Vol. 1. – P. 87–94. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115559807>.
32. Gomez, J. C. Flicker Measurement and Light Effect / J. C. Gomez, M. M. Morcos // IEEE Power Engineering Review, 2002. – Vol. 22, № 11. – P. 11–15. – DOI 10.1109/MPER.2002.1045562.

References

1. McGranaghan, M. F., Roettger, B. Economic Evaluation of Power Quality. *IEEE Power Engineering Review*, 2003, vol. 22, no. 2, pp. 8–12.
2. Bure, I. G., Khavsuriani, I. M., Kiselev, M. N., Kozyrkov, A. Yu. Impact of Modern Equipment in Residential and Office Complexes on Electricity Quality. *Energetik*, 2017, no. 1, pp. 42–46.
3. L'vova, E. V., Nikiforov, A. A., Sharonov, M. A., Stepanov, M. F. Investigation of Digital Methods for Active and Reactive Power Measurement in Power Grids. *Mathematical Modelling, Computer and Physical Experimentation in Natural Sciences*, 2023, no. 4. Available at: mathmod.esrae.ru/44-186 (accessed 21.01.2025).
4. McGranaghan, M. F., Santoso, S. Challenges and Trends in Analyzing Electric Power Quality Measurement Data. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007. DOI: 10.1155/2007/57985.
5. McEachern, A. A Free Simulator Program for Teaching Power Quality Concepts. *Proceedings of the 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization*. Barcelona, Spain, 2007, pp. 1–4. DOI 10.1109/EPQU.2007.4424112.
6. Bam, L., Jewell, W. Review: Power System Analysis Software Tools. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. San Francisco, USA, 2005, vol. 1, pp. 139–144. DOI: 10.1109/PES.2005.1489097.
7. Patne, N. R., Thakre, K. L. Stochastic Estimation of Voltage Sag Due to Faults in the Power System by Using PSCAD/EMTDC Software as a Tool for Simulation. *Journal of Electrical Power Quality and Utilization*, 2007, vol. 13, no. 2, pp. 59–63.
8. Filho, J. M. C., Leborgne, R. C., Abreu, J. P. G. et al. Validation of Voltage Sag Simulation Tools: ATP and Short-Circuit Calculations Compared with Field Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 3, pp. 1472–1480. DOI 10.1109/TPWRD.2008.916752.
9. Hadi, S. *Power System Analysis*. 3rd ed. PSA Publishing LLC, 2011. 772 p.
10. Ntombela, M., Kaberere K. K., Folly K. A., Petroianu, A. I. An Investigation into the Capabilities of MATLAB Power System Toolbox for Small Signal Stability Analysis in Power Systems. *Power Engineering Society Inaugural Conference and Exhibition in Africa*. Durban, South Africa: IEEE, 2005, pp. 242–248. DOI 10.1109/PE-SAFR.2005.1611822.
11. Milano, F. An Open Source Power System Analysis Toolbox. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, vol. 20, no. 3, pp. 1199–1206. DOI 10.1109/TPWRS.2005.851911.

12. Vanfretti, L., Milano, F. Application of the PSAT, an Open Source Software for Educational and Research Purposes. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Tampa, USA, IEEE, 2007, pp. 1–7. DOI 10.1109/PES.2007.385952.
13. Sybille, G., Hoang, L. H. Digital Simulation of Power Systems and Power Electronics using the MATLAB/Simulink Power System Blockset. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. Singapore: IEEE, 2000, vol. 4, pp. 2973–2981. DOI 10.1109/PESW.2000.847358.
14. Sybille, G., Brunelle P., Hoang L. H. et al. Theory and Applications of Power System Blockset, a MATLAB/Simulink-based Simulation Tool for Power Systems. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. Singapore: IEEE, 2000, vol. 1, pp. 774–779. DOI 10.1109/PESW.2000.850165.
15. Dessaint, L. A., Al-Haddad, K., Hoang, L. H. et al. A Power System Simulation Tool Based on Simulink. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, vol. 46, no. 6, pp. 1252–1254. DOI 10.1109/41.808019.
16. Schoder, K., Hasanovic, A., Feliachi, A., Hasanovic A. PAT: A Power Analysis Toolbox for MATLAB/Simulink. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, vol. 18, no. 1, pp. 42–47. DOI 10.1109/TPWRS.2002.807117.
17. Meer, R., Khan, Y., Wani, N. R., Ali Al-Arainy, A. The Estimation of Lightning Impulses Superimposed onto Pre-Stressed DC Breakdown Voltages Using the Leader Propagation Method. *Energies*, 2022, vol. 15, pp. 1708–1719. DOI 10.3390/en15051708.
18. Okabe, S., Takami, J., Tsuboi, T., Ueta, G. Discussion on Standard Waveform in the Lightning Impulse Voltage Test. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 147–156. DOI 10.1109/TDEI.2013.6451353.
19. 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. *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer Nature Switzerland, 2020, vol. 337, pp. 250–271. DOI 10.1007/978-3-030-65283-8_21.
20. Artyukhov, I. I., Solomin, M. A., L'vova, E. V. A Method of Reactive Power Measurement in Industrial Alternating Current Mains Supplies. *Proceedings of the 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov: IEEE, 2016, pp. 36–366. DOI 10.1109/APEDE.2016.7879029.
21. L'vova, E. V., Sharonov, P. A., Sharonov, M. A. Optimal Estimation of Parameters of Signals in Industrial AC Networks. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2023, no. 9, pp. 32–38 (In Russ.).
22. L'vova, E. V., Nikiforov, A. A., Balaban, O. M., Sharonov, M. A. Comparison of Digital Algorithms for Active Power Measurement: Overview of Discrete Signal Processing Methods. *Caspian Journal: Management and Advanced Technologies*, 2024, no. 1 (65), pp. 122–135 (In Russ.).
23. L'vov, A. A., Seranova, A. A., Ermakov, R. V., Muchkaev A. S. Comparison of Quasi-Harmonic Signal Parameter Estimation Methods. *Radio Engineering*, 2019, no. 8 (12), pp. 88–95. DOI 10.18127/j00338486-201908(12)-14 (In Russ.).
24. Seranova, A., Ermakov, R., Sytnik, A. et al. Comparison of Methods for Parameter Estimating of Superimposed Sinusoids. *Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 337: Recent Research in Control Engineering and Decision Making*. Springer Nature Switzerland, 2020, pp. 140–151. DOI 10.1007/978-3-030-65283-8_12.
25. Moutchkaev, A. S., Kong, S.-H., L'vov, A. A. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Theory and Algorithm. *Proceedings of the 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, Russia: IEEE, 2016, pp. 1–6. DOI 10.1109/APEDE.2016.7879042.
26. Moutchkaev, A.S., Kong, S.-H., L'vov A. A. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Analysis and Results. *Proceedings of the 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, Russia: IEEE, 2016, pp. 1–6. DOI 10.1109/APEDE.2016.7879043.
27. Grady, W. M., Santoso, S. Understanding Power System Harmonics. *IEEE Power Engineering Review*, 2001, issue 11, pp. 8–11.
28. Tang, L., McGranaghan, M., Ferraro, R. et al. Voltage Notching Interaction Caused by Large Adjustable Speed Drives on Distribution Systems with Low Short-Circuit Capacities. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, vol. 11, no. 3, pp. 1444–1453. DOI: 10.1109/61.517503.
29. Majorov, B. G. Models of Composite Harmonic Half-Waves and Time Discretization Connection with Entropy of Temporal Signal Parameters. *Informatics and Automation*, 2024, vol. 23, no. 3, pp. 831–858. DOI 10.15622/ia.23.3.7.
30. Bhonsle, D. C., Kelkar, R. B. Simulation of Electric Arc Furnace Characteristics for Voltage Flicker Study using MATLAB. *International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering*. Sivakasi, India, 2011, pp. 174–181. DOI 10.1109/ICONRAEECE.2011.6129773.
31. Golkar, M. A., Tavakoli Bina, M., Meschi, S., Toosi, K. N. A Novel Method of Electrical Arc Furnace Modeling for Flicker Study. *Renewable Energy & Power Quality Journal*, 2007, vol. 1, pp. 87–94. Available at: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115559807>.
32. Gomez, J. C., Morcos, M. M. Flicker Measurement and Light Effect. *IEEE Power Engineering Review*, 2002, vol. 22, no. 11, pp. 11–15. DOI 10.1109/MPER.2002.1045562.

Статья поступила в редакцию 31.07.2025; одобрена после рецензирования 08.09.2025; принята к публикации 26.01.2026.

The article was submitted 31.07.2025; approved after reviewing 08.09.2025; accepted for publication 26.01.2026.

УДК 004.056.55

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.003

ПРИМЕНЕНИЕ ФИШИНГА ПРОТИВ ТЕКУЩЕГО СТАНДАРТА БЕСПАРОЛЬНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ FIDO2

Панченко Александр Романович, Южный федеральный университет, 347900, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Фрунзе, 55а,
аспирант, ORCID: 0009-0001-4720-5164, e-mail: alpanchenko@sfnedu.ru

В данной работе описывается исследование текущего стандарта беспарольной аутентификации FIDO2 на наличие уязвимостей и подтверждение его недостаточной устойчивости к AitM-атакам. Для достижения поставленной цели автор провёл анализ стандарта на наличие слабых мест, после чего реализовал и использовал обнаруженную уязвимость. Затем он сосредоточился на разработке потенциального способа защиты. В результате исследования был проведён подробный анализ текущего стандарта. По его итогам была обнаружена возможность, позволяющая получить логин и пароль легитимного пользователя за счёт изоляции всех компонентов, связанных с FIDO2. Для реализации данной уязвимости использовалась модифицированная атака «атакующий посередине» (AitM), в рамках которой было развёрнуто программное обеспечение с открытым исходным кодом под названием EvilGinx. При рассмотрении реализации необходимо понимать, что автор не вправе публиковать все параметры и программный код, используемый при выполнении атаки. В рамках моделирования данной уязвимости и её последующей эксплуатации было подтверждено отсутствие доказательной устойчивости у текущего стандарта беспарольной аутентификации FIDO2 к AitM-атакам. Был предложен способ потенциальной защиты от выявленной слабости, а также рассмотрены механизмы, которые могут быть использованы для её нейтрализации. Обнаруженная слабость подтверждает недостаточную устойчивость FIDO2 к AitM-атакам.

Ключевые слова: FIDO2, AitM, URL, Passkey, magic link, WebAuthn, CTAP2.1, пароль, аутентификация, фишинг

THE USE OF PHISHING AGAINST THE CURRENT FIDO2 PASSWORD-FREE AUTHENTICATION STANDARD

Panchenko Alexander R., South Federal University, 55a Frunze St., Taganrog, 347900, Russian Federation,
postgraduate student, ORCID: 0009-0001-4720-5164, e-mail: alpanchenko@sfnedu.ru

This paper describes a study of the current FIDO2 password-free authentication standard for vulnerabilities and confirmation of its insufficient resistance to AitM attacks. To achieve this goal, the author analyzed the standard for weaknesses, after which he implemented and exploited the discovered vulnerability. He then focused on developing a potential defense method. As a result of the study, a detailed analysis of the current standard was carried out. As a result, an opportunity was discovered that allows you to obtain the username and password of a legitimate user by isolating all components related to FIDO2. To implement this vulnerability, a modified attacker-in-the-middle (AitM) attack was used, which deployed open-source software called EvilGinx. When considering the implementation, it is necessary to understand that the author does not have the right to publish all the parameters and program code used in the attack. As part of the modeling of this vulnerability and its subsequent exploitation, the lack of evidence-based resistance of the current FIDO2 password-free authentication standard to AitM attacks was confirmed. A method of potential protection against the identified weakness was proposed, as well as mechanisms that can be used to neutralize it. The discovered weakness confirms the insufficient resistance of FIDO2 to AitM attacks.

Keywords: FIDO2, AitM, URL, Passkey, magic link, WebAuthn, CTAP2.1, password, authentication, phishing

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире такое понятие, как фишинг, можно встретить повсеместно. Фишинг, или phishing, – вид интернет-мошенничества, целью которого является получение доступа к конфиденциальным данным пользователей: логинам и паролям. Само слово произошло от видоизменённого английского слова fishing, которое обозначает рыбалку или выуживание. В английской версии термин пишется через ph- (phishing). Это отсылает к названию телефонного мошенничества 90-х годов – phreaking (слияние слов phone и freak).

Способов проведения данного вида мошенничества сейчас существует огромное количество. Самое примитивное, но тем не менее рабочее – рассылка писем от лица брендов, банков, государственных структур, друзей или коллег. В таких письмах может находиться прямая ссылка на сайт, который внешне неотличим от настоящего, но при этом является лишь уловкой мошенников, чтобы жертва ввела туда какие-либо данные. Другим вариантом будет заражение системы жертвы вредоносным ПО сразу после открытия такого письма.

Можно смело утверждать, что фишинговые атаки являются крайне серьёзной и актуальной проблемой. Статистика говорит именно об этом. Саму статистику по количеству атак и их динамике

можно изучить у ведущих организаций, занимающихся киберугрозами [1–3]. Из статистики Group-IB за 2022 г. можно зафиксировать, что было выявлено и заблокировано пятьдесят девять тысяч фишинговых сайтов. Около семи тысяч таких сайтов были использованы против пользователей из РФ. Ключевым фактором изменения динамики является тот факт, что количество в два раза превысило аналогичный показатель годом ранее [4]. По данным от команды по реагированию на инциденты информационной безопасности, за 2021 г. было обнаружено и заблокировано 32 тысячи ресурсов [5], а в статистике за 2022 г. таких ресурсов уже 60 тысяч [6]. Рост почти в два раза. Из статистики от рабочей группы по борьбе с фишингом (APWG) можно зафиксировать значительный рост фишинговых атак. «Что касается глобальных тенденций, то в 2022 г. APWG зафиксировала около 4,7 миллиона фишинговых атак. С 2019 г. наблюдается ежегодное увеличение числа атак более чем на 150 %» [7, с. 3]. Если же рассмотреть географию основных стран – целей таких атак, то, по статистике DMARC, наиболее атакуемыми странами были: Россия, США, Молдавия, Нидерланды и Таиланд [8].

Рассмотрев более свежие данные, можно увидеть следующую картину: за 2024 г. количество фишинговых ресурсов выросло по отношению к 2023 г. [9], но уже в 2025 г. число таких ресурсов сократилось [10]. При детальном изучении данной статистики станет ясно, что ситуация не слишком воодушевляющая. Можно заметить, что хоть количество ресурсов уменьшилось, сложность атак растёт с каждым годом [11]. Важным элементом является использование социальной инженерии, создающей ощущение срочности или угрозы. В таких случаях появляется проблема обнаружения спама, который предшествует фишинговой атаке [12]. Всё большая сложность атак позволяет злоумышленникам проникать в самые защищённые сферы.

Исходя из всех этих данных, можно увидеть страшную динамику роста либо количества, либо качества фишинговых атак. Одной из целей этих атак может быть пароль жертвы. Для защиты от данных атак уже достаточно давно разрабатываются методы противодействия. Одним из них является беспарольная аутентификация. Но, как оказалось, и она не панацея; её можно успешно атаковать одним из видов сложного фишинга. Тем самым было подтверждено отсутствие доказательной устойчивости текущего стандарта FIDO2 к атакам типа AitM.

ЧТО ТАКОЕ КЛЮЧИ ДОСТУПА

Ключи доступа (Passkey) [13, с. 203] – это технология аутентификации без пароля, основанная на асимметричной криптографии. Система использует два ключа: открытый и закрытый. Автор ранее рассматривал проблемы паролей и возможные пути их замены [14], а также атаку на протокол WebAuthn (часть стандарта FIDO2), известную как «ложный клиент», которая позволяет получить доступ к аккаунту легитимного пользователя, защищённого текущим стандартом беспарольной аутентификации [15]. Эта атака требует тщательной подготовки и социальной инженерии. Несмотря на существующие недостатки, ключи доступа, по мнению автора, являются перспективной заменой паролям.

Настоящая работа посвящена анализу устойчивости стандарта FIDO2 к фишинговым атакам типа AitM. Данные были получены из официальной документации FIDO и статьи [16]. Стандарт FIDO2 состоит из протоколов WebAuthn и CTAP2.1. Информация о WebAuthn взята с официального сайта W3C и из статей [17–19]. Предыдущие анализы безопасности WebAuthn демонстрировали его высокую криптостойкость в рамках FIDO2 [20, с. 453]. Принцип работы CTAP2.1 описан в официальной документации FIDO и статьях [21, 22].

Принцип работы технологии заключается в следующем: в системе пользователя создаются закрытый и открытый ключи. Закрытый ключ при регистрации или аутентификации остаётся на устройстве пользователя (особенно это касается мобильных ключей). Открытый ключ передаётся по сети и используется для проверки подписи запроса. Проще говоря, открытый ключ может только расшифровать сообщение, зашифрованное закрытым ключом, но не наоборот.

Основные особенности безопасности ключей доступа: закрытый ключ не покидает устройство, что снижает риск его компрометации. Ключи устойчивы к фишингу, так как запросы привязаны к конкретному сервису, исключая кражу данных через поддельные сайты. Ввод пароля или PIN-кода на устройстве не позволяет получить доступ к аккаунту с других устройств, что нейтрализует угрозу кейлоггеров.

Технология аутентификации продемонстрировала свою устойчивость к фишинговым атакам. Однако ключи доступа не являются всемогущими. Подготовленный злоумышленник может найти уязвимости. В данной статье рассматривается один из таких способов, однако все детали и программный код атаки не приводятся по понятным причинам.

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ УЯЗВИМОСТИ

Сначала рассмотрим подробнее причины возникновения уязвимостей, а затем уже её реализацию. Как было сказано ранее, использование беспарольной аутентификации даёт ощутимые преимущества. Она может позволить защититься даже от очень сложных атак фишинга, так как фактор знания (пароль) не распространяется по сети. Пользователю не нужно запоминать сложные пароли, которые в идеале должны быть разными для каждого ресурса. Сами ключи криптографически

крайне стойкие, если сравнивать их с теми паролями, что зачастую создают пользователи.

Но всё упирается в тот факт, что вместе с ключами доступа многие ресурсы продолжают использовать менее безопасные альтернативные варианты аутентификации, например, парольную с дополнительным фактором. Данный факт омрачает надёжность технологии Passkey.

Для того чтобы использовать данную поддержку парольной аутентификации в свою пользу, злоумышленник должен применить AitM (Adversary-in-the-Middle) атаку. Она позволяет нарушителю манипулировать тем, что видит легитимный пользователь на этапе аутентификации, изменяя HTML, CSS, изображения или JavaScript на странице входа, которая проксируется для конечного пользователя. Злоумышленник может контролировать процесс аутентификации и удалять все ссылки на ключи доступа. На рисунке 1 показан процесс входа в систему с атакой на метод аутентификации и без неё.

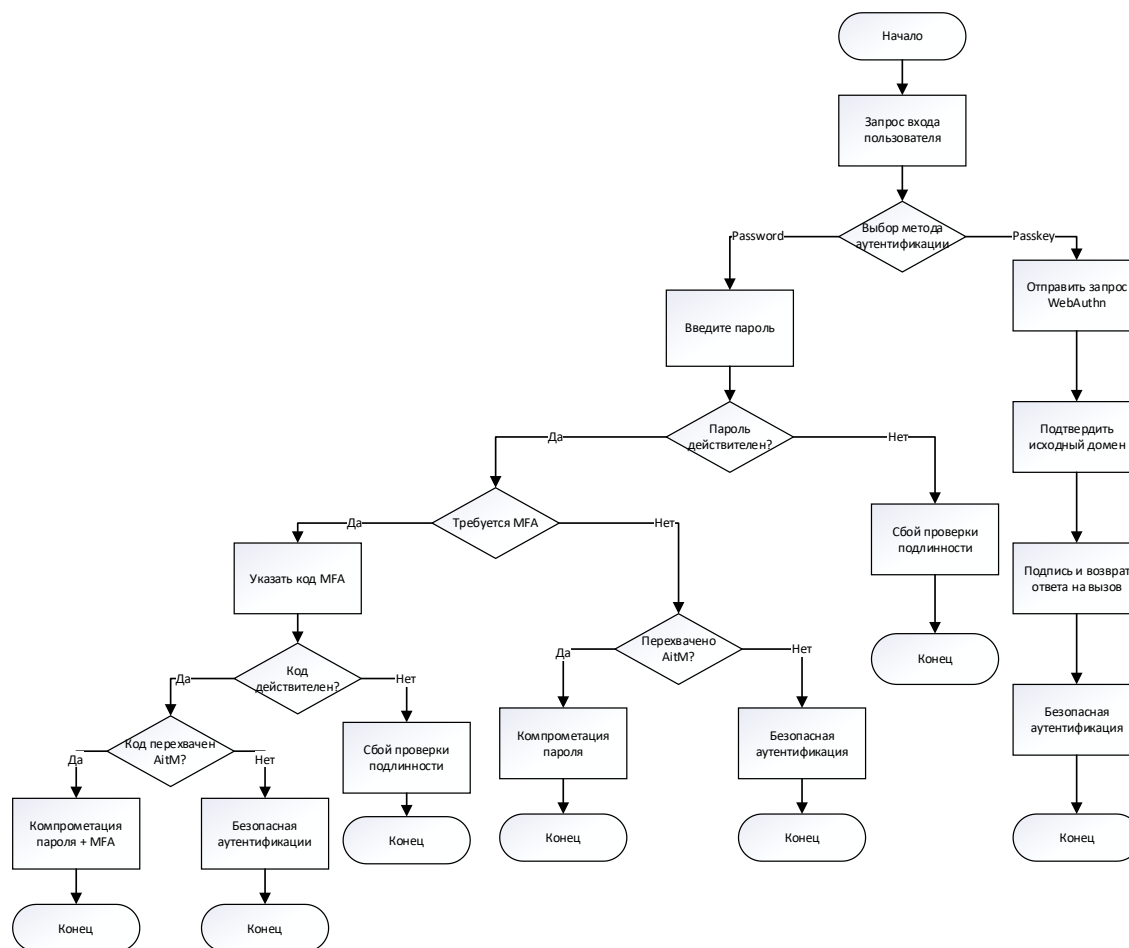


Рисунок 1 – Схема входа в систему с атакой на метод аутентификации и без

Теперь рассмотрим саму реализацию атаки с учётом тех ограничений, под которыми находится автор подобных материалов.

ПРИМЕР АТАКИ: GITHUB

В рамках данной атаки использовалось ПО с открытым исходным кодом, которое позволяет выполнять атаку AitM и обходить MFA. Данное ПО называется Evilginx. В его основе лежат конфигурационные файлы, именуемые «фишлеты». Эти файлы определяют поведение прокси-сервера во время выполнения воздействия на жертву.

После запуска сервера EvilGinx и начала его работы злоумышленник увидит id и название запущенного «фишлета» (рис. 2).

id	phishlet	hostname	path	template	ua_filter	redirect_url	og
0	github		/mdfSNqwE			https://www.g...	---

Рисунок 2 – ID запущенного фишлета

Сам сервер EvilGinx работает по принципу проксирования оригинальных страниц через домен, который нарушитель вводит на этапе конфигурации сервера. Схема работы EvilGinx показана на рисунке 3.

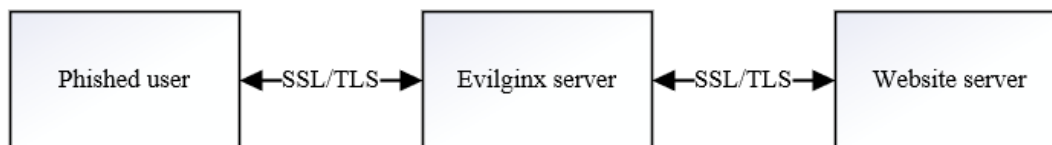


Рисунок 3 – Схема работы EvilGinx

В рамках данной атаки использовался стандартный «фишлет» Github, который можно найти в различных пользовательских репозиториях на самом Github, но он был модифицирован для удаления всех следов беспарольной аутентификации. По понятным причинам, описанным ранее, автор не будет приводить код модифицированного «фишлета».

В момент, когда пользователь переходит по ссылке-приманке, он увидит обычную страницу входа на Github (рис. 4). Всё из-за того, что это и есть настоящая страница входа на Github, только проксируемая через Evilginx.

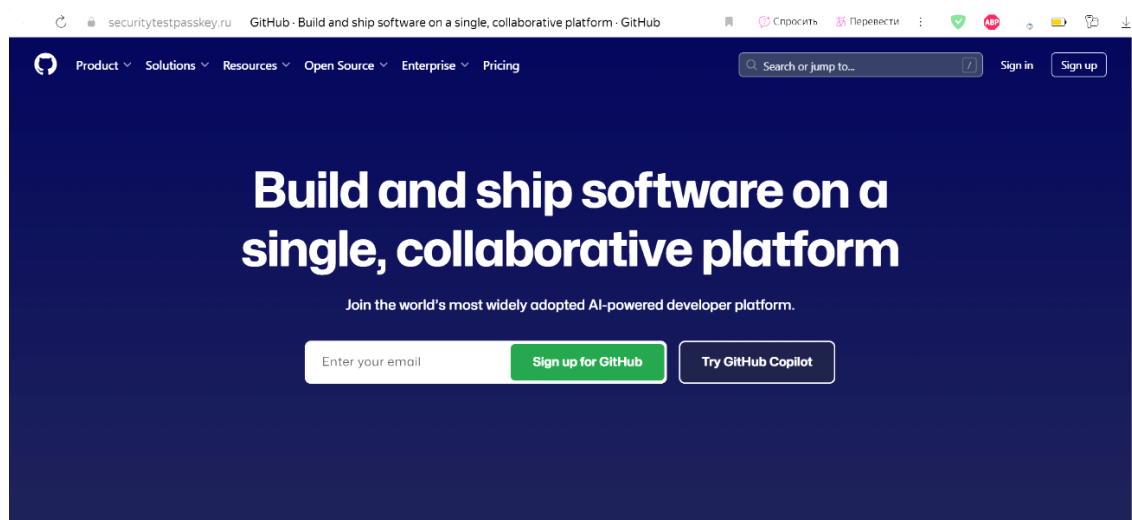
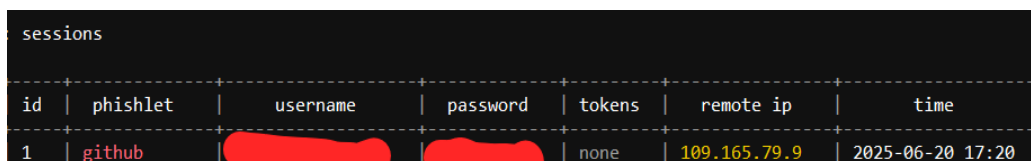


Рисунок 4 – Пример фишинговой страницы, проксируемой через EvilGinx

После перехода на страницу входа жертва может увидеть ничем не отличающуюся форму для входа в GitHub (рис. 5).

Рисунок 5 – Страница входа (проксируемый оригинал)

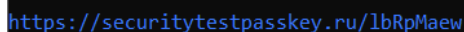
В данном случае, если пользователь войдёт через логин и пароль, то злоумышленник получит эти данные в открытом виде. Пример показан на рисунке 6. На приведённом примере логин и пароль были замазаны.



id	phishlet	username	password	tokens	remote ip	time
1	github	[REDACTED]	[REDACTED]	none	109.165.79.9	2025-06-20 17:20

Рисунок 6 – Логин и пароль в руках злоумышленника

И в данной ситуации не поможет даже MFA, так как страница и сервер лишь проксируются, а не подменяются, и, соответственно, все запросы MFA пройдут успешно, если человек введёт реальные данные. Единственный вариант человека – увидеть отличие в URL, но тут уже начинает работать внимательность пользователя и хитрость злоумышленника при создании домена. Плюс сам софт позволяет скрыть все параметры в ссылке, тем самым делая единственным демаскирующим фактором сам фишинговый домен нарушителя. Автор статьи не преследовал цель сделать домен скрытым. Пример такой ссылки-приманки показан на рисунке 7.



<https://securitytestpasskey.ru/lbRpMaew>

Рисунок 7 – Пример замаскированной ссылки

Данная атака позволяет получить все данные парольной аутентификации. И в данном случае спасением станет беспарольная аутентификация, которая не передаёт закрытый ключ никуда с аутентификатора. Данной точки зрения придерживается и сам создатель ПО Куба Гречки, но об этом уже было сказано ранее. Всё так, если бы не один нюанс. Используя всё тот же «фишлет», его можно модифицировать для удаления всех следов входа беспарольным методом. В итоге после этих модификаций жертва увидит лишь вариант входа через логин и пароль и никаких упоминаний беспарольного способа входа. Пример показан на рисунке 8.

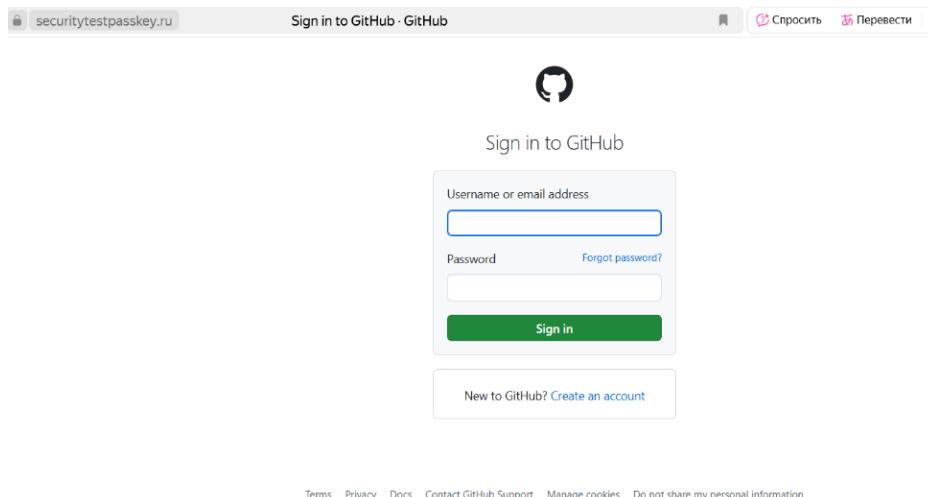


Рисунок 8 – Модифицированная страница входа

В результате пользователь может войти через логин и пароль, тем самым подарив их нарушителю вместе с токеном аутентификации/файлами cookie, которые злоумышленник может использовать для постоянного доступа к учётной записи, а механизм, который должен спасать от этого, не сработал, так как был просто изолирован.

В случае использования ключей доступа в качестве второго фактора аутентификации злоумышленнику может быть немного сложнее действовать, но только если предусмотрены один или несколько альтернативных методов. Необходимо понимать, что нарушителю не составит труда переписать сам HTML-код страницы, чтобы либо удалить метод аутентификации с помощью Passkey, либо использовать инъекцию JavaScript, чтобы перейти к одному из альтернативных методов. При этом это может быть сделано так, что пользователь даже не заметит, что у него был выбор.

Стоит заметить, что методы двухфакторной аутентификации, такие как приложение-аутентификатор или код восстановления, также не защищены от AitM: злоумышленник снова сможет получить все учётные данные и токены/cookie, необходимые для доступа к учётной записи.

Стоит помнить, что если в качестве второго фактора используется Passkey, то нарушитель, использующий AitM, уже получит как минимум имя пользователя, номер телефона или адрес электронной почты жертвы, а также, в случае GitHub, и пароль жертвы.

В зависимости от процесса аутентификации ему может быть отказано в доступе к целевому сайту. Наличие пароля от учётной записи может позволить злоумышленникам проводить атаки методом подбора пароля на других сайтах, где у жертвы есть учётная запись. Тут начинается жестокая реальность, в которой пользователи не создают сложный и уникальный пароль для каждого сайта, а пользуются одним и тем же, зачастую не самым стойким.

И если ключ доступа от веб-сайта будет удалён из учётной записи пользователя, а другой фактор аутентификации не заменит его, то впоследствии нарушитель может получить доступ к исходной учётной записи.

Причины, из-за которых атака с редактированием аутентификации возможна, не всегда чисто технические. Зачастую данные причины следующие:

1. Множество пользователей недостаточно хорошо знакомы с технологией Passkey.
2. Разработчики могут не знать, как AitM может изменить представление для входа в систему.
3. Восстановление аккаунта в случае утери Passkey затруднительно без использования менее надёжных методов.

Если бы не необходимость восстановления учётной записи, процесс аутентификации по ключам доступа мог бы быть довольно простым и устойчивым к AitM. В реальности всё не так радужно, и они будут неизбежно утрачены из-за потери и/или сброса устройства. В качестве частичного решения можно использовать менеджер паролей для управления ключами доступа. Это обеспечивает большую устойчивость к потере, и всё же компромисс заключается в том, что безопасность самого хранилища менеджера паролей теперь в лучшем случае зависит от мастер-пароля и второго секретного кода.

ТЕКУЩИЕ МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ РЕЗЕРВНОГО ВАРИАНТА АУТЕНТИФИКАЦИИ

Все текущие методы проверки собраны в таблице.

Таблица – Методы проверки и их надёжность

Метод проверки	Уточнение
Пароль	Уязвим для AitM, поскольку пароль вводится в потоке, контролируемом злоумышленником
Контрольные вопросы	Уязвимы для AitM и могут стать причиной последующих атак на другие учётные записи с использованием тех же вопросов
Push-уведомление для доверенных устройств	Уязвим для AitM, поскольку аутентифицирует существующий сеанс, контролируемый злоумышленником
Код в SMS/телефоне/электронном письме/приложении для аутентификации или сохранённый резервный код	Уязвим для AitM, поскольку код вводится в поток, контролируемый злоумышленником
Восстановление социальных /доверенных контактов	Может помешать AitM, если восстановление выполняется в новом сеансе, но это неудобно и работает только для крупных аккаунтов в социальных сетях
Проверка документов	Это неудобно, но может помешать AitM, если восстановление будет выполнено в новом сеансе. В противном случае злоумышленник может получить доступ к загруженным вами документам и самостоятельно восстановить вашу учётную запись. Также может способствовать краже личных данных в других местах
Магическая ссылка на заранее указанный адрес электронной почты/SMS-номер	Может помешать работе AitM, если ссылка создаёт новый сеанс, а не работает в существующем сеансе, контролируемом злоумышленником
Второй аппаратный ключ FIDO2	Безопасный

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ

В рамках потенциальных способов защиты от данной атаки автор может предложить следующее решение: использовать «magic link» или магическую ссылку. Магическая ссылка – это метод аутентификации без пароля, когда пользователь получает одноразовый URL для входа по электронной почте (или SMS). Клик по ссылке позволяет войти без необходимости ввода пароля. Несколько ключевых функций безопасности данного вида ссылок: одноразовый токен, который становится недействительным, чтобы предотвратить повторное использование; ограниченное время действия

(например, 10 минут); ограниченная скорость отправки, которая определяет количество отправляемых магических ссылок в заданный временной интервал; привязка к устройству/браузеру; ограничение использования ссылки на неоригинальном устройстве или IP, чтобы предотвратить перехват.

Для повышения безопасности необходимо модифицировать их, создав некую концепцию «защищённых магических ссылок». По мнению автора, такая ссылка должна гарантировать, что после перехода по ней, полученной по электронной почте, пользователю будет предложен новый безопасный процесс аутентификации, изолированный от любой существующей скомпрометированной сессии AitM. В рамках этого нового процесса также запрашивается аутентификация с помощью ключа доступа, если он включён в учётной записи пользователя. Альтернативно пользователь может выбрать другие методы многофакторной аутентификации, такие как мобильный аутентификатор или код по электронной почте, если ключ доступа недоступен или не может быть использован.

Внедрение таких ссылок позволит значительно повысить безопасность процесса резервной аутентификации, защищая учётную запись от несанкционированного доступа, даже если злоумышленник получит доступ к почтовому ящику пользователя. Основные позиции концепции защищённых ссылок следующие:

1. Любая попытка понизить уровень аутентификации, отказавшись от ключей доступа, привела к выходу из существующего сеанса перед продолжением.
2. Настойчиво требовать от пользователей добавить несколько ключей доступа, чтобы потеря одного из них не привела к блокировке доступа к аккаунту или необходимости использовать менее безопасные методы аутентификации.
3. Если у пользователя есть хотя бы один зарегистрированный аутентификатор, то требовать вход по нему, а не по паролю, причём принудительно.
4. Сделайте возможность использования второго ключа в качестве альтернативного метода аутентификации.

Блок-схема работы данной концепции показана на рисунках 9 и 10. На рисунке 9 показана та часть, в которой злоумышленник проводит атаку и пытается изолировать Passkey от жертвы. На рисунке 10 показан процесс после того, как пользователю пришла защищённая магическая ссылка. Перейдя по ней, пользователь открывает новую сессию, которая будет изолирована от скомпрометированного сеанса.

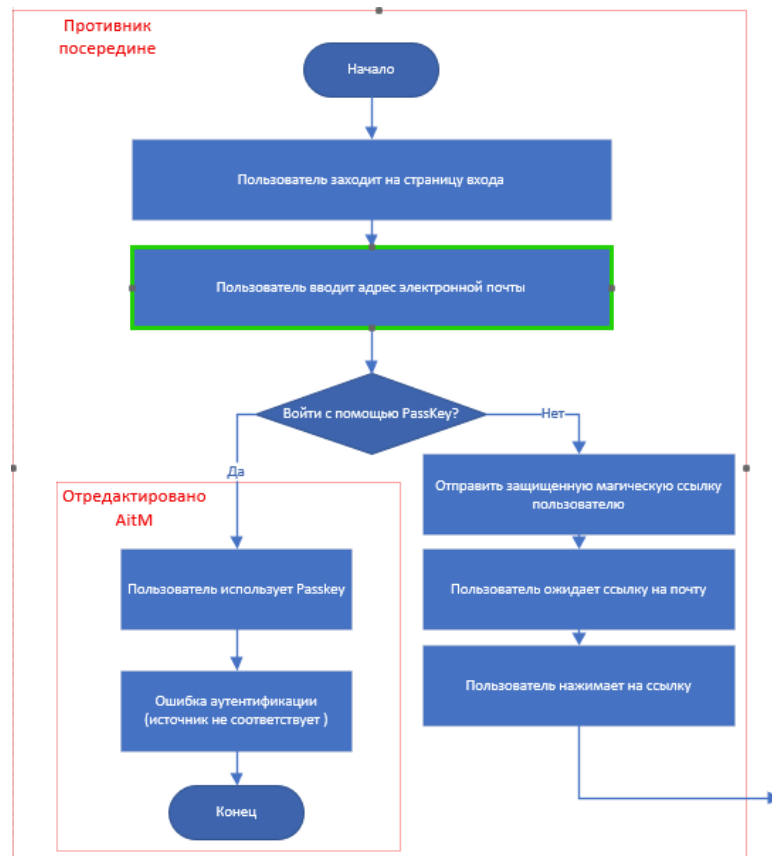


Рисунок 9 – Изоляция от редактирования AitM

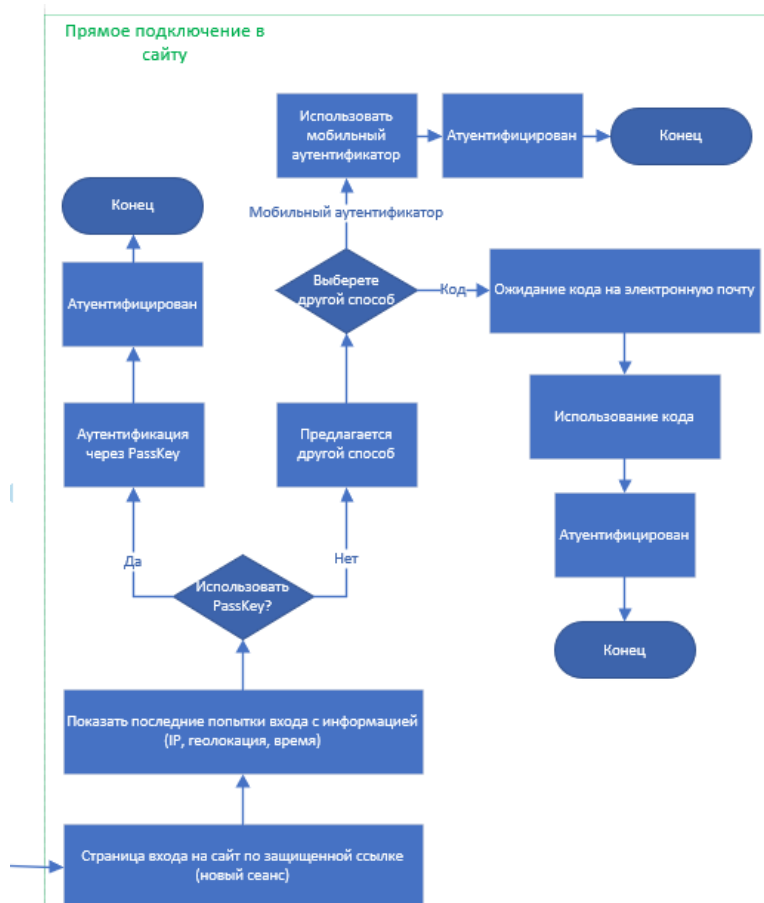


Рисунок 10 – Создание новой защищённой сессии

Другим вариантом решения данной уязвимости может стать использование машинного обучения для обнаружения и предотвращения атаки в реальном времени [23].

В рамках продемонстрированной атаки всё происходило на сайте GitHub. Это не отменяет того, что данную атаку можно использовать не только там.

Рассмотрим методы защиты в таких случаях. Обнаружение подозрительных запросов на аутентификацию, а точнее неожиданных переопределений при аутентификации. Для этого в разных операционных системах нужно воспользоваться разными утилитами. Например, в Linux необходимо использовать tcpdump. Пример такого использования показан на рисунке 11. Также отследить такие переопределения можно при помощи Wireshark.

```
tcpdump -i eth0 -A 'tcp port 80 and (http.request or http.response)' | grep -i "fido|authentication"
```

Рисунок 11 – Отслеживание переопределения на Linux

В Windows необходимо обратиться к журналу событий для поиска необычных запросов, связанных с аутентификацией. Коды таких запросов следующие: 4771, 4768. Пример команды для поиска событий показан на рисунке 12.

```
Get-WinEvent -LogName Security | Where-Object { $_.Id -eq 4771 -or $_.Id -eq 4768 } | Format-List
```

Рисунок 12 – Отслеживание переопределения на Windows

После этого необходимо уделить внимание политике безопасности, связанной с FIDO2. Здесь лучшим решением будет использовать FIDO2 в качестве единственного разрешённого метода многофакторной аутентификации. Для этого необходимо зайти в локальную политику безопасности, далее в локальные политики, а затем в параметры безопасности и там найти пункт, который делает вход возможным только через устройства, поддерживающие FIDO2. Путь к данному параметру показан на рисунке 13.

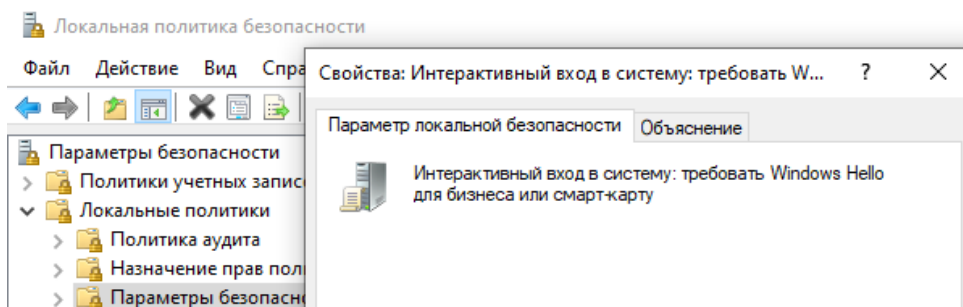


Рисунок 13 – Включение использования ключей FIDO2

Немного коснёмся варианта с обнаружением «фишлетов», которые настроены на изоляцию от пользователя функционала FIDO2. Для этого можно использовать правила YARA. Важное замечание: в правиле автор намеренно не указывает, какие параметры «фишлета» он собирается искать, так как ранее он уже говорил, что не может публиковать код «фишлета» по понятным причинам. Пример правила показан на рисунке 14.

```
rule FIDO_Downgrade_Phishlet {
  meta:
    description = "Detects modified phishlets targeting FIDO authentication"
  strings:
    $s1 = "fido downgrade" nocase
    $s2 = "auth_method=basic" nocase
  condition:
    any of them
}
```

Рисунок 14 – Пример правила YARA для поиска фишлетов

Это правило необходимо применять для сканирования файлов по пути: /var/www/html/phishlets, так как нам известно, что «фишлеты» лежат в данном каталоге, но это скорее защита от EvilGinx, а не от всей атаки AitM. После чего можно использовать политику условного доступа в Azure AD для блокировок подозрительных попыток аутентификации. Пример показан на рисунке 15.

```
New-AzureADMSConditionalAccessPolicy -DisplayName "Block FIDO Downgrade" -State "Enabled" -Conditions @{
  ClientAppTypes = @("Browser")
  Applications = @("All")
  Locations = @(Get-AzureADMSNamedLocationPolicy | Where-Object { $_.DisplayName -eq "High-Risk Countries" })
} -GrantControls @{
  BuiltInControls = @("Block")
}
```

Рисунок 15 – Политика условного доступа Azure AD

Можно сформировать взаимодействие с SIEM (Security Information and Event Management) для обнаружения угроз в реальном времени. Для этого, как ранее было указано, необходимо искать события с ID, равным 4771 и 4768. Настройте переадресацию событий Windows (Windows Event Forwarding, WEF) для отправки журналов в Splunk/ELK и настройте оповещения для authentication_method=basic в учётных записях с высокими привилегиями.

```
index=security (event_id=4771 OR event_id=4768)
| search "authentication_method=basic"
| stats count by user, src_ip
```

Рисунок 15 – Взаимодействие с SIEM

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования была подтверждена возможность проведения фишинговой атаки на текущий стандарт FIDO2 и его недостаточная устойчивость к AitM-атакам. Обнаруженная уязвимость позволяет ограничить использование беспарольного варианта аутентификации для жертвы, вынуждая её использовать старые, менее устойчивые методы. В результате такой атаки злоумышленник получит в своё распоряжение логин и пароль жертвы. При реализации данной уязвимости сложностью для атакующего является создание домена, который будет визуально похож на сайт-оригинал, чтобы максимально снять с себя подозрения жертвы. Представленные автором методы защиты не являются панацеей, а скорее способами усложнить жизнь для злоумышленников. Фишинговые атаки нацелены на неосведомлённость людей, их недоверие к новым технологиям, а также на обратную совместимость со старыми, менее защищёнными.

Список источников

1. Chen, S. Behavioral Analysis of Phishing Emails: A Machine Learning Approach / S. Chen et al. // *Journal of Computer Security*. – 2021. – Vol. 15, № 3. – P. 201–215.
2. Беспалова, Н. В. Анализ зарубежного опыта применения интеллектуальных методов в задачах защиты объектов критической информационной инфраструктуры финансового сектора / Н. В. Беспалова, С. А. Корчагин, Д. В. Сердечный, В. В. Селиверстов // *Инженерный вестник Дона*. – 2024. – № 5. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n5y2024/9196.
3. Корчагин, С. А. Разработка концепции обеспечения безопасности критической инфраструктуры финансового сектора / С. А. Корчагин, Д. В. Сердечный, Е. С. Раздьяконов, Н. В. Беспалова // *Инженерный вестник Дона*. – 2024. – № 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2024/9176.
4. Garcia, M. A. Phishing Resilience in Corporate Environments: A Case Study / M. A. Garcia // *Journal of Information Systems Security*. – 2022. – Vol. 7, № 2. – pp. 88–95.
5. Kim, J. H. Psychological Factors Influencing Phishing Susceptibility: A Meta-analysis / J. H. Kim // *Journal of Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*. – 2022. – Vol. 10, № 4. – P. 511–520.
6. Smith, R. E. Phishing Trends in E-commerce: Implications for Online Security / R. E. Smith // *International Journal of Electronic Commerce*. – 2023. – Vol. 18, № 1. – P. 45–52.
7. Селиверстов В. В., Корчагин С. А. Анализ актуальности и состояния современных фишинг-атак на объекты критической информационной инфраструктуры / В. В. Селиверстов, С. А. Корчагин // *Инженерный вестник Дона*. 2024. № 6. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2024/9277.
8. Liu, Q. Machine Learning Approaches for Phishing Detection: A Comparative Study / Q. Liu et al. // *Journal of Information Technology Research*. – 2023. – Vol. 9, № 3. – P. 511–525.
9. BI.ZONE Brand Protection: более чем в 1,5 раза увеличилось количество фишинга в 2024 году. – URL: <https://bi.zone/news/bi-zone-brand-protection-bolee-chem-v-1-5-raza-uvelichilos-kolichestvo-fishinga-v-2024-godu/> (дата обращения: 04.02.2026).
10. Bi.Zone: в 2025 году в 1,5 раза сократилось число фишинговых ресурсов. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/25993025> (дата обращения: 04.02.2026).
11. Спам стал хитрее: баннеры, календари и новые уловки мошенников в 2025 году. – URL: <https://securitymedia.org/news/spam-stal-khitree-bannery-kalendari-i-novye-ulovki-moshennikov-v-2025-godu.html> (дата обращения: 05.02.2026).
12. Частикова, В. А. Обзор актуальных проблем основных методов фильтрации спама и анализ их эффективности / В. А. Частикова, К. В. Козачек // *Вестник Адлгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки*. – 2021. – № 3 (286). – С. 98–106. – DOI 10.53598/2410-3225-2021-3-286-98-106.
13. Dr. A. Shaji, George. The Dawn of Passkeys: Evaluating a Passwordless Future / Dr. A. Shaji George // *Partners Universal Innovative Research Publication (PUIRP)*. – 2024. – № 02 (01). – P. 202–220. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10697886>.
14. Панченко, А. Р. Проблемы парольной аутентификации: обзор потенциальных вариантов замены, их анализ и сравнение / А. Р. Панченко // *Инженерный вестник Дона*. – 2025. – № 10 (130). – С. 171–192.
15. Панченко, А. Р. Использование уязвимостей протокола webauthn для получения несанкционированного доступа / А. Р. Панченко // *Вопросы кибербезопасности*. – 2025. – № 6 (70). – С. 48–57. – DOI 10.21681/2311-3456-2025-6-48-57.
16. Mitra, A. FIDO2: A comprehensive study on passwordless authentication / A. Mitra, & A. Ghosh // *International Journal of Engineering Research and Applications*. – 2024. – № 14 (7). – P. 58–63. <https://doi.org/10.9790/9622-14075863>.
17. Dourado, M. R. Implementing a web application for W3C WebAuthn protocol testing / M. R. Dourado, M. Gestal, & J. M. Vázquez-Naya. – MDPI, 2020. – № 5. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020054005>.
18. Bindel, N. To Attest or Not to Attest, This is the Question – Provable Attestation in FIDO2 / N. Bindel, N. Gama, S. Guasch, E. Ronen // *Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2023. ASIACRYPT 2023. Lecture Notes in Computer Science*. Singapore: Springer, 2023. – Vol. 14443. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8736-8_10.
19. Hanzlik, L. Token meets Wallet: Formalizing Privacy and Revocation for FIDO2 / L. Hanzlik, J. Loss, & B. Wagner // *2022 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*. – 2023. – P. 1491–1508. <https://doi.org/10.1109/sp46215.2023.10179373>.
20. Gudipati, R. R. Demystifying fido: a technical deep dive into modern authentication / R. R. Gudipati // *International Journal of Information Technology and Management Information Systems*. – 2025. – Vol. 16 (2). – P. 452–466. https://doi.org/10.34218/ijitmis_16_02_029.
21. Bindel, N. FIDO2, CTAP 2.1, and WebAuthN 2: Provable Security and Post-Quantum Instantiation / N. Bindel, C. Cremers, & M. Zhao // *2022 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*. – 2023b. <https://doi.org/10.1109/sp46215.2023.10179454>.
22. Guan, J. A Formal Analysis of the FIDO2 Protocols / J. Guan, H. Li, H. Ye, Z. Zhao // *Computer Security – ESORICS 2022. ESORICS 2022. Lecture Notes in Computer Science*. – Springer, Cham, 2022. – Vol. 13556. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17143-7_1.
23. Частикова, В. А. Применение нейросетевых методов для обнаружения и предотвращения фишинговых атак, направленных на кражу персональных данных / В. А. Частикова, К. В. Козачек, Е. А. Чикиндина, П. В. Бушуева // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2025. – № 3 (71). – С. 80–87.

References

1. Chen, S. et al. Behavioral Analysis of Phishing Emails: A Machine Learning Approach. *Journal of Computer Security*, 2021, vol. 15, no. 3, pp. 201–215.
2. Bepalova, N. V., Korchagin, S. A. Serdechny, D. V. Seliverstov, V. V. Analysis of foreign experience in applying intelligent methods to protect critical information infrastructure assets in the financial sector. *Engineering Journal of Don*, 2024, no. 5. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n5y2024/9196 (In Russ.).
3. Korchagin, S. A. Serdechny, D. V., Razdyakonov, E. S., Bepalova, N. V. Development of a security concept for critical infrastructure in the financial sector. *Engineering Journal of Don*, 2024, no. 4. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2024/9176 (In Russ.).
4. Garcia, M. A. Phishing Resilience in Corporate Environments: A Case Study. *Journal of Information Systems Security*, 2022, vol. 7, no. 2, pp. 88–95.
5. Kim, J. H. Psychological Factors Influencing Phishing Susceptibility: A Meta-analysis. *Journal of Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 2022, vol. 10, no. 4, pp. 511–520.
6. Smith, R. E. Phishing Trends in E-commerce: Implications for Online Security. *International Journal of Electronic Commerce*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 45–52.
7. Seliverstov, V. V., Korchagin, S. A. Analysis of the relevance and state of modern phishing attacks on critical information infrastructure facilities. *Engineering Journal of the Don*, 2024, no. 6. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2024/9277 (In Russ.).
8. Liu, Q. et al. Machine Learning Approaches for Phishing Detection: A Comparative Study. *Journal of Information Technology Research*, 2023, vol. 9, no. 3, pp. 511–525.
9. *BI.ZONE Brand Protection: the number of phishing attacks increased more than 1.5 times in 2024*. Available at: <https://bi.zone/news/bi-zone-brand-protection-bolee-chem-v-1-5-raza-uvlichilos-kolichestvo-fishinga-v-2024-godu/> (accessed 04.02.2026).
10. *Bi.Zone: the number of phishing resources decreased by 1.5 times in 2025*. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/25993025> (accessed 04.02.2026)
9. *BI.ZONE Brand Protection: phishing incidents increased more than 1.5-fold in 2024*. Available at: <https://bi.zone/news/bi-zone-brand-protection-bolee-chem-v-1-5-raza-uvlichilos-kolichestvo-fishinga-v-2024-godu/> (accessed 04.02.2026) (In Russ.).
10. *Bi.Zone: the number of phishing resources decreased 1.5-fold in 2025*. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/25993025> (accessed 04.02.2026) (In Russ.).
11. *Spam has become more cunning: banners, calendars, and new fraud tactics in 2025*. Available at: <https://securitymedia.org/news/spam-stal-khitree-bannery-kalendar-i-novye-ulovki-moshennikov-v-2025-godu.html> (accessed 05.02.2026) (In Russ.).
12. Chastikova, V. A., Kozachek, K. V. Overview of current issues regarding major spam filtering methods and analysis of their effectiveness. *Bulletin of Adyghe State University. Series 4: Natural-Mathematical and Technical Sciences*, 2021, no. 3 (286), pp. 98–106. DOI 10.53598/2410-3225-2021-3-286-98-106 (In Russ.).
13. Dr. A. Shaji, George. The Dawn of Passkeys: Evaluating a Passwordless Future. *Partners Universal Innovative Research Publication (PUIRP)*, 2024, no. 02 (01), pp. 202–220. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10697886>.
14. Panchenko, A. R. Password authentication issues: an overview of potential replacements, their analysis, and comparison. *Engineering Journal of Don*, 2025, no. 10 (130), pp. 171–192 (In Russ.).
15. Panchenko, A. R. Exploiting WebAuthn protocol vulnerabilities to gain unauthorized access. *Cybersecurity Issues*, 2025, no. 6 (70), pp. 48–57. DOI 10.21681/2311-3456-2025-6-48-57 (In Russ.).
16. Mitra, A., & A. Ghosh FIDO2: A comprehensive study on passwordless authentication. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2024, no. 14 (7), pp. 58–63. <https://doi.org/10.9790/9622-14075863>.
17. Dourado, M. R. Implementing a web application for W3C WebAuthn protocol testing / M. R. Dourado, M. Gestal, & J. M. Vázquez-Naya. MDPI, 2020, no. 5. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020054005>.
18. Bindel, N., Gama, N., Guasch, S., Ronen, E. To Attest or Not to Attest, This is the Question – Provable Attestation in FIDO2. *Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2023. ASIACRYPT 2023. Lecture Notes in Computer Science*. Singapore: Springer, 2023, vol. 14443. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8736-8_10.
19. Hanzlik, L., Loss, J. & Wagner, B. Token meets Wallet: Formalizing Privacy and Revocation for FIDO2. *2022 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 2023, pp. 1491–1508. <https://doi.org/10.1109/sp46215.2023.10179373>.
20. Gudipati, R. R. Demystifying fido: a technical deep dive into modern authentication. *International Journal of Information Technology and Management Information Systems*, 2025, vol. 16 (2), pp. 452–466. https://doi.org/10.34218/ijitmis_16_02_029.
21. Bindel, N., Cremers, C. & Zhao, M. FIDO2, CTAP 2.1, and WebAuthN 2: Provable Security and Post-Quantum Instantiation. *2022 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 2023b. <https://doi.org/10.1109/sp46215.2023.10179454>.
22. Guan, J., Li, H., Ye, H., Zhao Z. A Formal Analysis of the FIDO2 Protocols. *Computer Security – ESORICS 2022. ESORICS 2022. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham, 2022, vol. 13556. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17143-7_1.
23. Chastikova, V. A., Kozachek, K. V., Chikindina, E. A., Bushueva, P. V. Application of Neural Network Methods for Detecting and Preventing Phishing Attacks Aimed at Personal Data Theft. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2025, no. 3 (71), pp. 80–87 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.02.2026; одобрена после рецензирования 01.04.2026; принята к публикации 22.05.2026.

The article was submitted 13.02.2026; approved after reviewing 01.04.2026; accepted for publication 22.05.2026.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.051

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.004

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ В КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Медведев Дмитрий Алексеевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, аспирант, ORCID: 0009-0005-5309-907X, e-mail: mail@medvedevd.ru

Ковалева Ольга Александровна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, доктор технических наук, доцент, 0000-0003-0735-6205, e-mail: solomina-oa@yandex.ru

Ковалев Сергей Владимирович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, 392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, доктор технических наук, доцент, 0000-0002-5961-7561, e-mail: sseedd@mail.ru

Статья посвящена оптимизации времени выполнения наиболее распространённых операций в корпоративных информационных системах. С применением встроенного функционала платформы 1С: Предприятие выявлены ключевые операции, выполняющиеся наибольшее количество времени, а также операции, выполняющиеся наибольшее количество раз. Вместе с этим совместно с представителями бизнеса и пользователями выделен перечень ключевых операций, сокращение времени выполнения которых принесёт наибольший эффект (операции, выполняемые высшим руководством компании). Предложен метод к построению эффективной ИТ-инфраструктуры с применением технологий виртуализации и кластеризации. Предложен метод решения проблемы лицензирования сервера приложений 1С: Предприятие, проявляющейся при миграции виртуальной машины на другое физическое оборудование (при автоматическом или ручном перемещении виртуальных машин на другую ноду кластера), заключающийся в выделении отдельного сервера лицензирования. Разработаны практические рекомендации по оптимизации настроек и программного кода. Реализован фоновый запуск процессов, позволяющий существенно сократить временные затраты пользователя при запуске сложных комплексных процессов. Механизм фонового запуска автоматически запускает процессы из очереди регламентным заданием каждые 10 секунд без участия пользователя. Оптимизирована процедура идентификации видов документов путём сокращения избыточных операций ввода-вывода заменой обращения к реквизитам через наименование на обращение к реквизитам через GUID (глобально уникальный идентификатор). Это повысило точность идентификации, так как GUID гарантирует уникальность идентификации значений, исключая возможные ошибки, связанные с повторяющимся наименованием. Результаты экспериментальных исследований доказывают, что разработанные методы по комплексной оптимизации ИТ-инфраструктуры и программного кода позволят сократить время выполнения ключевых операций, выполняемых в корпоративных информационных системах, на 13–33 %.

Ключевые слова: корпоративная информационная система, системные операции, анализ производительности, виртуализация, кластеризация, ИТ-инфраструктура

PERFORMANCE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF KEY OPERATIONS ON CORPORATE INFORMATION SYSTEMS

Medvedev Dmitry A., Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0009-0005-5309-907X, e-mail: mail@medvedevd.ru

Kovaleva Olga A., Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Mathematical Modeling and Information Technologies, ORCID: 0000-0003-0735-6205, e-mail: solomina-oa@yandex.ru

Kovalev Sergey A., Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Mathematical Modeling and Information Technologies, ORCID: 0000-0002-5961-7561, e-mail: sseedd@mail.ru

This article focuses on optimizing the execution time of the most common operations in corporate information systems. Using the built-in functionality of the 1C: Enterprise platform, we identified operations with the longest execution times and those performed most frequently. In collaboration with business stakeholders and end-users, we prioritized key operations where time reduction would yield the greatest impact (particularly those used by senior management). We propose a method

for building an efficient IT infrastructure leveraging virtualization and clustering technologies. Additionally, we present a solution to 1C: Enterprise application server licensing issues that arise during virtual machine migration (whether automated or manual cluster node transfers) through implementation of a dedicated licensing server. Practical recommendations for configuration and code optimization were developed, including: background process launching that significantly reduces user wait times for complex operations. The automated scheduling mechanism initiates queued processes every 10 seconds without user intervention. Streamlined document type identification by replacing name-based attribute references with GUID (globally unique identifier) calls, eliminating redundant I/O operations. This enhances identification accuracy as GUIDs prevent errors caused by duplicate names. Experimental results demonstrate that our comprehensive optimization approach reduces execution time of critical operations in corporate information systems by 13–33 %.

Keywords: corporate information system, system operations, performance analysis, virtualization, clustering, IT infrastructure

ВВЕДЕНИЕ

ИТ-отрасль является одной из лидирующих отраслей современной экономики России. Развитие цифровой экономики приводит к существенному влиянию и повышению эффективности деятельности других экономических сфер [1].

С развитием информационных технологий происходит расширение понятия ИТ-инфраструктуры. В современном представлении она включает практически все аспекты информатизации предприятия. [2]. Высокая конкуренция на рынке предъявляет бизнесу ряд априорных требований в виде скорости получения, обработки и надёжного хранения актуальных данных [3].

В статьях [4–6] рассматриваются основные проблемы производительности конфигураций на платформе 1С: Предприятие, которые возникают при разработке, тестировании и эксплуатации информационных систем, проблемы организации поиска. Проанализированы ключевые факторы, влияющие на снижение производительности, включая ошибки проектирования, недостаточную оптимизацию кода и инфраструктурные ограничения. В статье [7] приведена базовая методика анализа проблем производительности в работающей многопользовательской системе 1С: Предприятие 8. В статье [8] представлена методика расчёта интегральной производительности APDEX при использовании в системах на базе 1С: Предприятие, позволяющая количественно оценить удовлетворённость пользователей. В статье [9] проведён анализ производительности и функциональных особенностей двух разновидностей базы данных в среде 1С: Предприятия, выявлены сильные и слабые стороны файловой и клиент-серверной архитектуры. В статье [10] уделено внимание методологии современных информационных технологий разработки программных продуктов, принцип программного управления, жизненный цикл информационных систем.

В рассмотренных выше статьях не описан подход к определению ключевых процессов, требующих сокращения времени выполнения, вопросы оптимизации настроек приложения 1С и влияния параметров виртуальных машин на общее время выполнения ключевых операций в корпоративных информационных системах на базе 1С: Предприятие.

Предпосылками проведения настоящего исследования стала задача повышения производительности работы сотрудников путём повышения производительности корпоративных информационных систем компании.

Основной целью исследования является разработка методов и подходов, способствующих уменьшению среднего времени выполнения ключевых операций в корпоративных информационных системах.

В рамках настоящего исследования необходимо решить следующие задачи:

- выявить ключевые операции, выполнение которых занимает наибольшее время, а также операции, выполняющиеся наибольшее количество раз;
- провести анализ факторов, влияющих на скорость выполнения ключевых операций;
- разработать метод организации ИТ-инфраструктуры с применением технологий виртуализации и кластеризации;
- разработать практические рекомендации по внедрению метода лицензирования серверов 1С: Предприятие при миграции виртуальных машин внутри кластера;
- провести экспериментальное исследование, позволяющее выявить зависимость между изменениями параметров виртуальных серверов и производительностью корпоративной информационной системы;
- провести прикладное исследование, направленное на повышение эффективности информационной системы путём оптимизации настроек и программного кода.

ВЫЯВЛЕНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СКОРОСТЬ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Для автоматизации бизнес-процессов ООО ВТБ Недвижимость была выбрана зарекомендовавшая себя на рынке программных продуктов платформа 1С: Предприятие, позволяющая автоматизировать бизнес-процессы девелоперской компании, повысить эффективность учётной деятельности, оптимизировать работу сотрудников и в целом повысить качество работы компании.

С помощью функционала измерения времени выполнения ключевых операций 1С: Предприятие проведён анализ и выявлены операции, выполнение которых занимает наибольшее время, а также операции, выполняющиеся наибольшее количество раз. Проведя совместную аналитику с руководителями направлений бизнеса и пользователями, наиболее активно использующими корпоративные информационные системы, был выделен перечень ключевых операций, сокращение времени выполнения которых принесёт наибольший эффект. В перечень ключевых операций включены как часто выполняющиеся операции, так и операции, выполняемые высшим руководством компании.

На производительность корпоративных информационных систем на платформе 1С: Предприятие влияют факторы, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы, оказывающие влияние на производительность

Фактор	Описание
Аппаратные ресурсы серверов (CPU, RAM)	Недостаток ядер или низкая тактовая частота CPU приводит к задержкам при обработке транзакций. Нехватка памяти вызывает частую подкачку данных на диск (swapping), что замедляет работу
Дисковая подсистема	Медленные HDD, отсутствие RAID или SSD увеличивают время отклика
Настройка серверов 1С и СУБД	Конфигурация кластера серверов 1С: неправильное распределение рабочих процессов (rphost) между серверами может привести к перегрузке сервера
Оптимизация СУБД	Отсутствие индексов в таблицах, неоптимизированные запросы снижают производительность
Архитектура баз данных	Размещение файлов (документов, изображений) внутри базы 1С увеличивает её размер и снижает производительность
Разделение баз данных	Совмещение данных управленческого учёта, электронного документооборота и других систем в одной базу создаёт конкуренцию за ресурсы и снижает производительность
Конфигурация и код 1С (не оптимизированные алгоритмы)	Циклы по большим таблицам без отборов, избыточные обращения к базам данных расходуют больше ресурсов
Настройка регламентных заданий	Длительные операции, выполняемые регламентными заданиями не должны выполняться в рабочее время
Виртуализация и кластеризация. Неправильная настройка виртуальных машин	Ограничение CPU и RAM, отсутствие резервирования ресурсов, проблема лицензирования 1С при миграции виртуальных машин между нодами

В рамках данного исследования, проведена работа по оптимизации лишь некоторых факторов, представленных на рисунке 1.



Рисунок 1 – Направления оптимизации факторов, влияющих на производительность корпоративных информационных систем

МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ ИТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛИЗАЦИИ И КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Клиент-серверный вариант развертывания платформы 1С: Предприятие

Платформа 1С: Предприятие предоставляет возможность выбора между двумя вариантами работы системы: файловый и клиент-серверный.

Клиент-серверный вариант подходит для организации одновременной работы большого количества пользователей, является более безопасным и отказоустойчивым.

Клиент-серверный вариант базируется на более надёжной трёхуровневой архитектуре (1С: Предприятие 8 Система Программ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://v8.1c.ru/> (дата обращения: 09.12.2024)).

В целях повышения надёжности ИТ-инфраструктуры, обеспечивающей необходимый уровень доступности корпоративных информационных систем, принято решение о развертывании платформы 1С: Предприятие в виртуальной среде. Виртуализация – это технология, которая позволяет использовать аппаратные ресурсы для запуска нескольких операционных систем или приложений. Виртуализация полезна для управления ресурсами, так как она позволяет многократно использовать аппаратное обеспечение, а также упростить управление и обеспечить более гибкие и эффективные решения [11].

Обеспечение высокой надёжности, отказоустойчивости и непрерывности вычислительного процесса компьютерных систем поддерживается при объединении вычислительных ресурсов в кластеры и основывается на использовании технологии виртуализации в результате перемещения виртуальных ресурсов, служб или приложений между физическими серверами при поддержке непрерывности вычислительных процессов [12].

Для построения кластера высокой доступности (high availability), обеспечивающего динамическое распределение вычислительных мощностей, отказоустойчивость и высокую надёжность, принято решение об использовании группы серверов, системы хранения данных, объединённых каналами связи. Отказоустойчивость кластера обеспечивается путём резервирования серверного и сетевого оборудования (серверы и коммутаторы ядра). Основным показателем надёжности сложной вычислительной системы является коэффициент готовности (КГ), который можно представить формулой:

$$КГ = TO / (TB + TO), \quad (1)$$

где TB – среднее время восстановления после отказа;

TO – суммарное время работы системы.

Критически важные и интерактивные приложения не могут выдержать 100 минут простоя в неделю. Они требуют систем высокой доступности – тех, которые обеспечивают КГ, равный 99,999 %. Это позволяет прерывать обслуживание не более чем на пять минут в год [13].

При развертывании использован вид резервирования нагруженный (горячий) резерв, при котором основной и резервные элементы системы нагружены одинаково. При этом каждый элемент готов принять нагрузку вышедшего из строя элемента.

С учётом планирования развертывания в компании двух систем на базе 1С: Предприятие с разным функционалом (система управления бизнес-процессами и система управленческого учёта) и разными пользователями, принято решение о развертывании двух серверов приложений платформы 1С: Предприятие.

Лицензирование в системе программ 1С: Предприятие поддерживается техническими средствами программной или аппаратной защиты. В поставке программных продуктов содержится конверт с пин-кодами программной защиты либо аппаратный ключ. Начиная с версии 8.2.10 платформы система 1С: Предприятие поддерживает одновременное использование программных и аппаратных лицензий при работе с одной и той же информационной базой.

При работе с виртуализацией применение аппаратного ключа защиты сервера 1С: Предприятие требуется ручное подключение ключей аппаратной защиты к виртуальной машине (Инструкция по разработке на 1С), однако существует проблема недоступности физического ключа, проявляющаяся при миграции виртуальной машины на другое физическое оборудование (например, при автоматическом распределении виртуальных машин в кластере, ручном перемещении виртуальной машины на другую ноду кластера для проведения обслуживания оборудования или отказе ноды кластера). При этом во многом нивелируется сам смысл виртуализации – отвязывание программной части от аппаратной.

Казалось бы, очевидным решением при работе с виртуализацией является работа с программным ключом сервера 1С: Предприятие, однако и этот способ не лишён подобной проблемы.

При получении программной лицензии происходит сбор информации о компьютере (ключевые параметры), на который будет установлена лицензия. Если в процессе дальнейшей работы будет изменён хотя бы один из ключевых параметров, необходимо будет заново получить программную лицензию, используя резервный пин-код.

При миграции виртуальной машины сервера 1С: Предприятие с одной ноды кластера другую изменяется ряд ключевых параметров, которые приводят к деактивации лицензии.

Решением проблем с деактивацией программных лицензий сервера 1С: Предприятие при миграции внутри кластера или при изменении конфигурации виртуальных машин является выделение отдельного сервера 1С: Предприятие для задач лицензирования. Целевая схема серверной инфраструктуры после выделения отдельного сервера 1С: Предприятие для задач лицензирования приведена на рисунке 2.

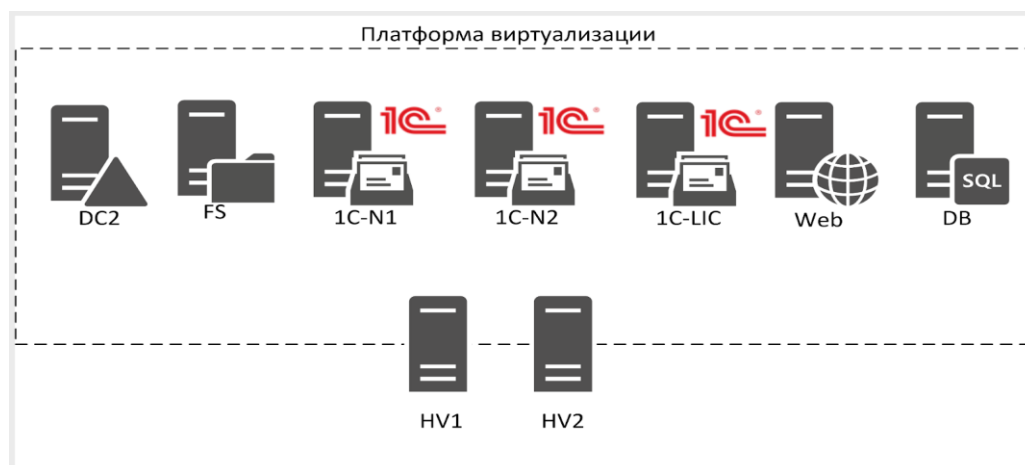


Рисунок 2 – Целевая схема серверной инфраструктуры

Выделение отдельного сервера лицензирования 1С: Предприятие позволило исключить возникновение проблем при изменении конфигурации виртуальных машин, обеспечивающих работу сервера приложений 1С: Предприятие, что позволило реализовать гибкость ИТ-инфраструктуры и обеспечило возможность её быстрой адаптации под требования бизнеса, сохраняя необходимую производительность.

ПРОГРАММНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ 1С: ПРЕДПРИЯТИЕ

С помощью встроенного инструмента платформы 1С «Анализ производительности» проведён анализ и выявлены операции, выполнение которых занимает наибольшее время, а также операции, выполняющиеся наибольшее количество раз. Так, например, при каждом открытии формы договора трижды проводилась загрузка элементов справочника номенклатуры, содержащего 4 255 значений.

В целях повышения быстродействия логика работы информационной системы перенастроена на загрузку элементов справочника «Номенклатура» только при обращении к соответствующему реквизиту на форме договора. Это исключило трёхкратную автоматическую загрузку элементов справочника при открытии карточки договора для всех пользователей. После корректировки справочник вызывается только сотрудниками, которые обращаются к соответствующему реквизиту договора (как правило, сотрудники бухгалтерии и финансовой службы).

Отключение автоматической проверки контрагентов по ЕГРН

Конфигурация 1С: Документ позволяет автоматически проверять контрагентов по ЕГРН, что может замедлить открытие документов, которые содержат в реквизитном составе данные о контрагенте. По умолчанию автоматическая проверка контрагентов по ЕГРН включена.

С целью повышения быстродействия корпоративных информационных систем и сокращения времени открытия форм документов, содержащих в реквизитном составе данные о контрагентах, автоматическая проверка контрагентов по ЕГРН отключена.

При этом функционал сервиса проверки контрагентов по ЕГРН сохранён в полном объёме и доступен через меню «Ещё» для ответственных за проверку контрагентов подразделений.

Фоновый старт процессов

В клиент-серверной версии информационной базы 1С: Документооборот доступен функционал фоновой загрузки документов (Фоновый старт процессов). Стартом процессов в фоновом режиме управляет настройка «Использовать фоновый старт процессов».

Фоновый старт процессов работает следующим образом: при нажатии кнопки «Стартовать и закрыть» процесс записывается и добавляется в специальную очередь. Эта очередь обрабатывается регламентным заданием «Старт процессов» без участия пользователя. По умолчанию регламентное задание выполняется каждые 10 секунд.

Была оптимизирована процедура идентификации видов документов: вместо неявной загрузки всех реквизитов через обращение к наименованию (в 1С при первом обращении к любому реквизиту через точку выполняется полное считывание данных объекта), реализовано явное определение видов документов с использованием уникальных GUID (глобально уникальный идентификатор).

Точечная идентификация по GUID исключает неявную загрузку ненужных данных, за счёт чего повышена производительность и сокращено время обработки благодаря отказу от избыточных операций ввода-вывода, а также улучшает точность идентификации, так как GUID гарантирует уникальность идентификации значений, исключая возможные ошибки, связанные с повторяющимся наименованием. Изменение структуры запроса приведено на рисунке 3.

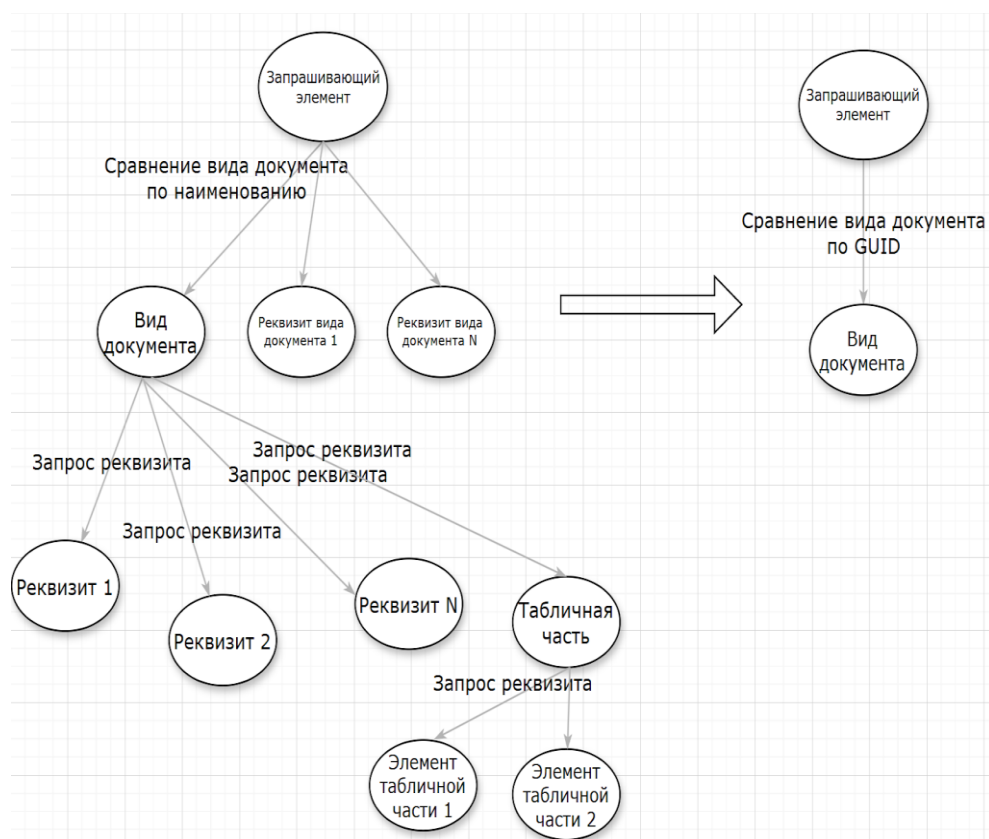


Рисунок 3 – Обращение к документу через GUID

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Были проведены экспериментальные исследования, позволяющие выявить зависимость между изменениями параметров виртуальных серверов и производительностью корпоративных информационных систем.

Чем выше стабильность и скорость работы корпоративных информационных систем, тем выше скорость работы сотрудников. Существует много различных вариантов оценки производительности ИТ-систем.

Начальные параметры виртуальных машин приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Начальные параметры виртуальных машин «Конфиг 1»

Сервер	Процессоры	Оперативная память, GB	Системный диск, ТВ	Диск данных, ТВ
1C-N1 (DOC)	10	16	0,2	–
1C-N2 (BIT)	8	24	0,2	–

Начальная конфигурация виртуальных машин «Конфиг 1» (10 процессорных ядер 1C-N1 (DOC), 16 Гб памяти, 8 процессорных ядер 1C-N2 (BIT), 24 Гб памяти).

Проведены замеры производительности при изменении параметров виртуальных машин.

Для онлайн-определения фактического использования ресурсов серверов использована система мониторинга Zabbix. С помощью анализа данных системы мониторинга выявлены периоды времени, в которые наблюдается недостаток оперативной памяти на сервере 1C-N2 (BIT).

После проведения замеров текущей производительности системы проведена корректировка параметров ИТ-инфраструктуры, обеспечивающей работу системы. Параметры серверов после корректировки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры виртуальных машин после корректировки «Конфиг 2»

Сервер	Процессоры	Оперативная память, GB	Системный диск, ТВ	Диск данных, ТВ
1C-N1 (DOC)	12 (+2)	16	0,2	–
1C-N2 (BIT)	10 (+2)	36 (+12)	0,2	–

Конфигурация виртуальных машин после модернизации «Конфиг 2» (12 процессорных ядер 1C-N1 (DOC), 16 Гб памяти, 10 процессорных ядер 1C-N2 (BIT), 36 Гб памяти).

Влияние изменения конфигурации серверов на производительность системы визуализировано на рисунке 4.

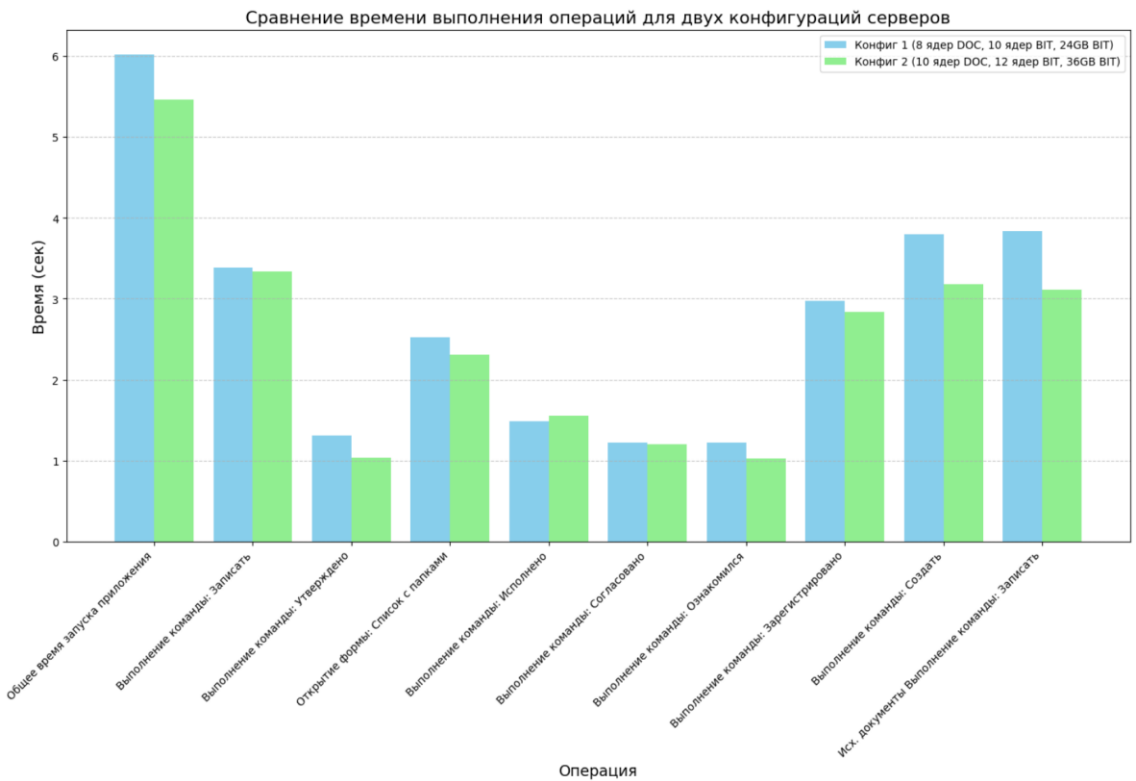


Рисунок 4 – Визуализация влияния конфигурации серверов на время запуска оборудования

Конфигурация виртуальных машин «Конфиг 2» показывает снижение среднего времени выполнения для большинства операций по сравнению с конфигурацией серверов до модернизации («Конфиг 1»).

Например:

Общее время запуска приложения: 6,02 → 5,46 (–9,3 %).

Выполнение команды: Записать: 3,38 → 3,34 (–1,2 %).

Исключением является выполнение команды: Исполнено: 1,49 → 1,56 (+4,7 %).

Дальнейший анализ текущей загрузки на виртуальные машины показал недостаток ресурсов центрального процессора при пиковых нагрузках (формирование отчётности, закрытие периодов бухгалтерской отчётности) на сервере 1C-N2 (BIT), в связи с чем проведена дополнительная корректировка параметров серверов «Конфиг 3», представленная в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры серверов после корректировки «Конфиг 3»

Сервер	Процессоры	Оперативная память, GB	Системный диск, TB	Диск данных, TB
1C-N2 (BIT)	12 (+2)	36 (+12)	0,2	—

В третьей корректировке параметров виртуальных машин «Конфиг 3» изменены параметры сервера 1C-N2 (BIT). Добавлено 2 процессорных ядра и 12 Гб оперативной памяти.

Влияние изменения конфигурации серверов на производительность системы в разрезе трёх конфигураций визуализировано на рисунке 5.

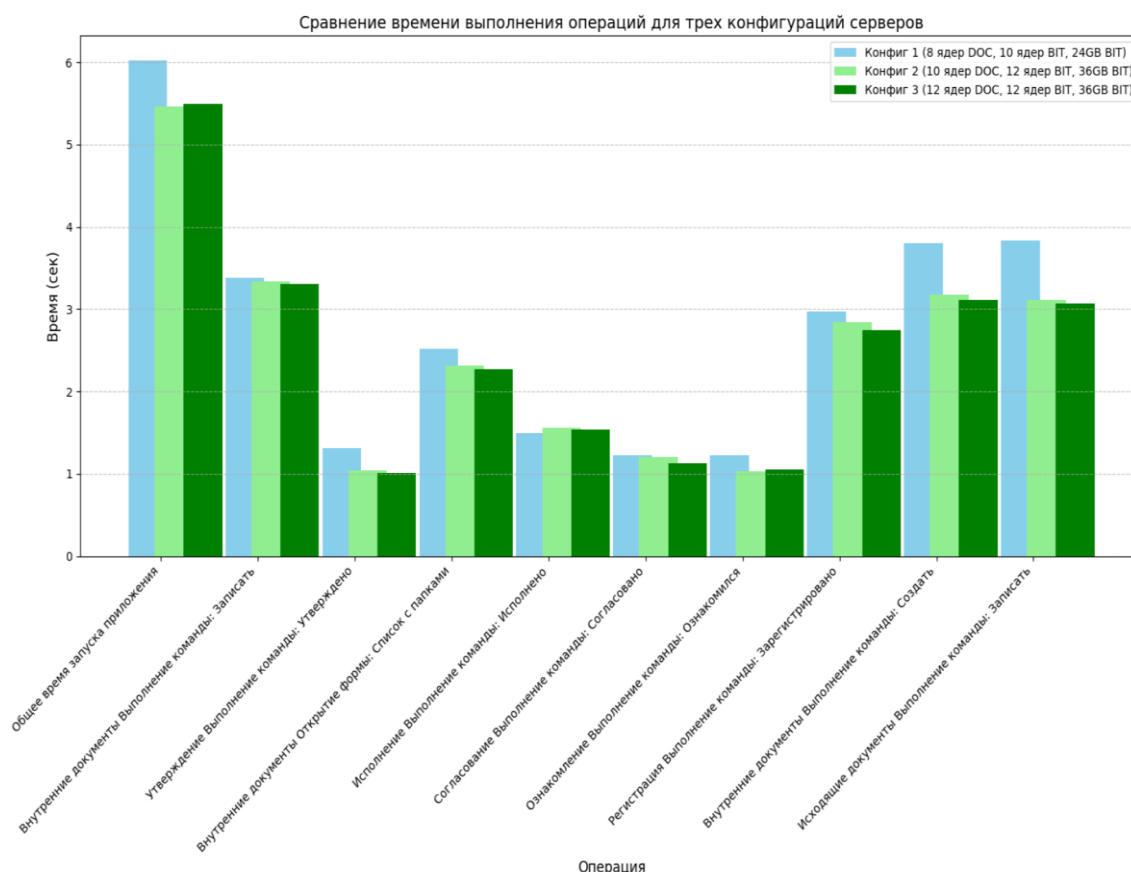


Рисунок 5 – Визуализация влияния конфигурации серверов на время запуска оборудования

Из рисунка 5 видно, что увеличение процессорных ядер и добавление памяти в целом положительно влияет на производительность системы, но некоторые операции (например, выполнение команды: Исполнено) могут зависеть от других факторов, например оптимизации кода.

Конфигурация «Конфиг 2» демонстрирует значительное улучшение производительности для большинства операций (например, снижение времени запуска приложения на 9,3 %). Однако введение «Конфиг 3» не привело к дальнейшему улучшению, что может указывать на достижение предела оптимизации ресурсов.

Увеличение ресурсов серверов улучшило общую производительность, но не все операции одинаково масштабируются. Для дальнейшей оптимизации будет проведён анализ и оптимизация кода приложения.

После проведения анализа и оптимизации кода приложения проведён замер времени выполнения ключевых операций за двухнедельный период. Информация по проведённым замерам представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Перечень оптимизируемых операций после повторного замера производительности. Конфигурация оборудования «Конфиг 1», «Конфиг 2», «Конфиг 3», «Конфиг 4»

Параметр	Замер 1 Число замеров	Замер 2 Число замеров	Замер 3 Число замеров	Замер 4 Число замеров («Конфиг 4»)	Замер 1 Среднее время выпол- нения (с)	Замер 2 Среднее время выпол- нения (с)	Замер 3 Сред- нее время вы- пол- нения (с)	Замер 4 Среднее время выпол- нения (с) («Кон- фиг 4»)
Общее время запуска приложения	379	367	310	668	6,02	5,46	5,49	5,23
Выполнение команды: Записать	958	1126	760	654	3,38	3,34	3,31	2,87
Утверждение: Выполнение команды: Утверждено	114	128	98	120	1,31	1,04	1,01	0,88
Открытие формы: Список с папками	313	326	216	374	2,52	2,31	2,27	2,11
Выполнение команды: Исполнено	545	830	680	622	1,49	1,56	1,54	1,27
Выполнение команды: Согласовано	442	496	502	354	1,22	1,20	1,13	1,08
Выполнение команды: Ознакомился	265	604	456	414	1,22	1,03	1,05	0,86
Выполнение команды: Зарегистрировано	95	126	86	104	2,97	2,84	2,75	2,35
Выполнение команды: Создать	102	102	82	70	3,80	3,18	3,11	2,97
Выполнение команды: Записать	147	1126	114	654	3,83	3,11	3,07	2,89
Открытие формы: Список с папками	313	326	216	374	2,52	2,31	2,25	2,03

Влияние кода и настроек приложения на производительность системы в разрезе трёх конфигураций и оптимизации кода приложения визуализировано на рисунке 6.

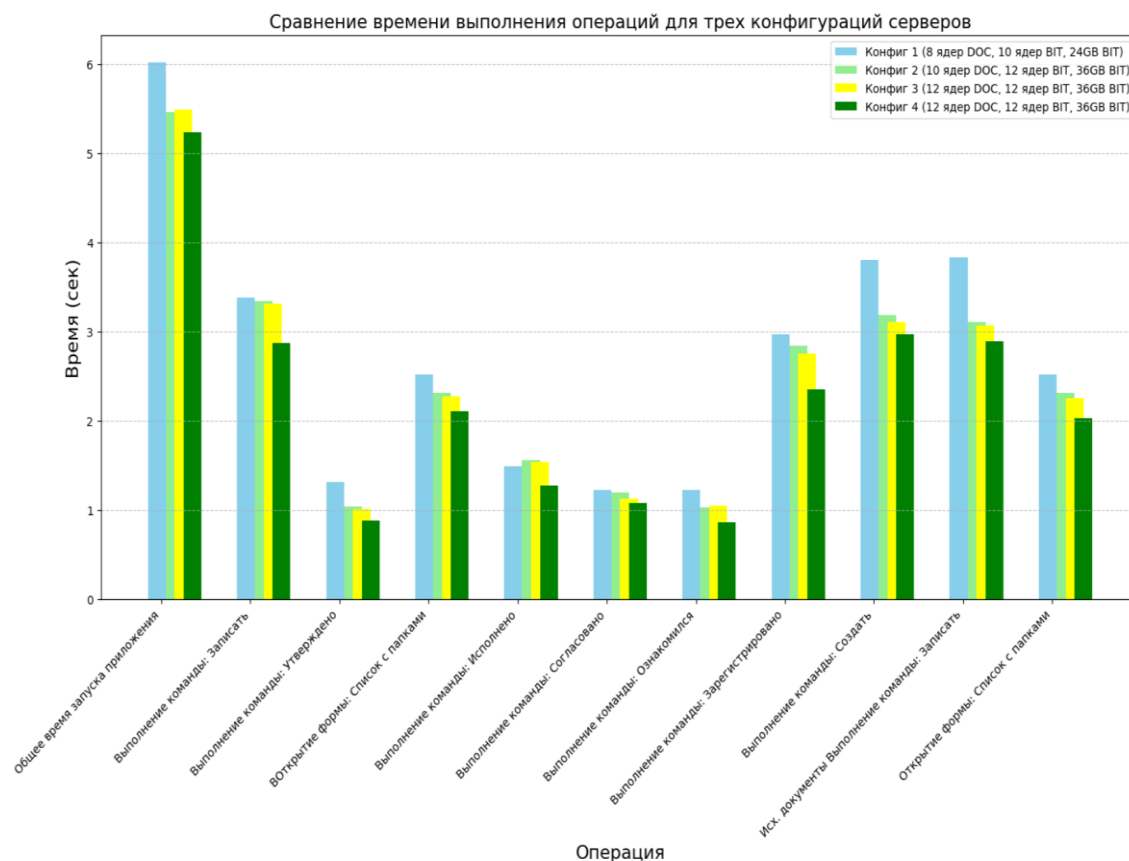


Рисунок 6 – Визуализация времени выполнения ключевых операций на 3 конфигурациях оборудования и оптимизации кода приложения

На основе анализа данных четырёх конфигураций (1 – исходная, 2 – оптимизация ресурсов, 3 – дополнительная оптимизация ресурсов, 4 – оптимизация кода и настроек) достигнуты результаты, представленные в таблице 6.

Таблица 6 – Ключевые результаты исследования

Операция	Сокращение времени (Конфигурация 1, Конфигурация 4), с	Улучшение, %
Общее время запуска приложения	6,02 → 5,23	13,1
Внутренние документы: Записать	3,38 → 2,87	15,1
Утверждение: Утверждено	1,31 → 0,88	32,8
Ознакомление: Ознакомился	1,22 → 0,86	29,5
Регистрация: Зарегистрировано	2,97 → 2,35	20,9
Исполнение: Исполнено	1,49 → 1,27	14,8

Практические рекомендации по внедрению метода лицензирования серверов 1С: Предприятие с выделением отдельного сервера лицензирования позволили избежать проблем при миграции виртуальных машин, выполняющих роль сервера 1С между нодами кластера.

Разработанный метод по комплексной оптимизации ИТ-инфраструктуры и программного кода позволил сократить время выполнения ключевых операций, выполняемых в корпоративных информационных системах на 13–33 %, с максимальным улучшением для операции утверждения документов (32,8 %). Достигнутые результаты в значительном повышении быстродействия корпоративных информационных систем позволяют говорить об эффективности предложенного подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённая в рамках данного исследования работа (аппаратная оптимизация, кластеризация, корректировка кода) позволила не только сократить время выполнения ключевых операций в корпоративных информационных системах, но и повысить отказоустойчивость системы.

Результаты экспериментов подтверждают, что комбинация инфраструктурных и программных улучшений является эффективной стратегией для масштабирования корпоративных систем на базе 1С.

Данное исследование способствует расширению теоретических представлений об оптимизации информационных систем, формированию новых методов построения эффективного и надёжного ИТ-ландшафта, а также даёт возможность масштабирования и обслуживания корпоративных информационных систем без прерывания работы пользователей.

Представленный в статье метод организации ИТ-инфраструктуры позволит повысить эффективность работы сотрудников и в целом повысить качество работы компаний при внедрении и эксплуатации корпоративных информационных систем.

В дальнейшем исследовании планируется изучение влияния новых факторов, оказывающих влияние на производительность корпоративных информационных систем, таких как: архитектура и оптимизация СУБД, аппаратные характеристики используемого оборудования, глубокий анализ и оптимизация кода систем. Планируется детальная проработка утечек памяти, отслеживание серверных вызовов с занятой оперативной памятью с целью проведения анализа кода, анализ таймаутов и блокировок, анализ аварийного завершения пользовательских сеансов. Планируется разработка и концептуальной схемы системы мониторинга кластеров серверов 1С: Предприятие, включающих также мониторинг производительности серверов СУБД, веб-серверов, файловых серверов и смежных систем.

Список источников

1. Бондаренко, В. Н. Влияние развития ИТ-отрасли на трансформацию сферы услуг в условиях развития цифровой экономики / В. Н. Бондаренко // Современные проблемы туризма и сервиса : сборник статей научных докладов по итогам V Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 28 апреля 2022 года / ФГБОУ ВО «Российский государственный университет туризма и сервиса». – Москва : Российский государственный университет туризма и сервиса, 2022. – С. 18–27.
2. Сабитова, Э. М. Перспективы развития информационной инфраструктуры / Э. М. Сабитова, Э. Ф. Амирова, Ш. М. Газетдинов // Актуальные проблемы бухгалтерского учёта и аудита в условиях стратегического развития экономики : сборник научных трудов по материалам Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых учёных, Казань, 23–24 марта 2023 года. – Казань : Казанский государственный аграрный университет, 2023. – С. 470–476.
3. Корниенко, Д. В. Автоматизация запуска сервера 1С с помощью инструментов контейнерной виртуализации / Д. В. Корниенко, М. О. Мельников, И. С. Иванников // Технично-технологические проблемы сервиса. – 2022. – № 1 (59). – С. 58–62.
4. Николаевский, Н. О. Проблемы производительности конфигураций на платформе 1С: Предприятие и роль devops в их оптимизации / Н. О. Николаевский // Теория и практика в условиях меняющегося глобального мира : сборник научных статей по итогам Международной межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13–14 декабря 2024 года. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский Центр Системного Анализа, 2024. – С. 44–49.
5. Савин, Г. И. Организация поиска в базе данных со связанными сущностями / Г. И. Савин, К. П. Погорелко // Программные продукты и системы. – 2024. – № 4. – С. 524–531.
6. Кордюков, Р. Ю. Модель и алгоритмизация оптимизационной задачи о назначениях в условиях дополнительных ограничений / Р. Ю. Кордюков, Р. В. Допира, А. В. Иванова, Ф. Н. Абу-Абед, Д. В. Мартынов // Программные продукты и системы. – 2016. – Т. 29, № 2. – С. 16–22.
7. Иванников, И. С. Тест Гилева и методика APDEX как средства тестирования платформ 1С / И. С. Иванников // Continuum. Математика. Информатика. Образование. – 2021. – № 1 (21). – С. 80–88.
8. Заручевская, Г. В. Недостатки метода APDEX при оценке производительности систем на платформе 1С / Г. В. Заручевская, И. А. Ермолин // Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов : сборник материалов XII Международной научно-практической конференции, Москва, 02 июня 2023 года. – Санкт-Петербург : Печатный цех, 2023. – С. 43–46.
9. Трясолобов, А. В. Файловый и клиент-серверный подход к реализации базы данных в среде 1С: Предприятия / А. В. Трясолобов // Проблемы и перспективы развития АПК региона : материалы Межвузовской студенческой научно-практической конференции, Пермь, 06 декабря 2022 года – 06 2023 года. – Пермь : ИПЦ «Прокрость», 2023. – С. 424–427.
10. Мустафаев, Н. Г. Управление разработкой программных продуктов для информационной системы перспективных систем и комплексов специального назначения / Н. Г. Мустафаев, Н. А. Баштанник, Н. Р. Байбиков, А. А. Понамаренко // Интеграция науки, общества, производства и промышленности: проблемы и перспективы : монография. – Уфа : ООО «Аэтерна», 2024. – С. 39–51.
11. Данилин, Д. Д. Виртуализация вычислительных машин и центры обработки данных в вычислительных сетях / Д. Д. Данилин, А. И. Мартышкин, Е. А. Данилов // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 97–12. – С. 58–60.

12. Богатырев, В. А. Модель надежности отказоустойчивого кластера с миграцией виртуальных машин / В. А. Богатырев, С. М. Алексанков, А. Н. Деркач // Программные продукты и системы. – 2019. – № 1. – С. 103–108.
13. Горбачева, Е. С. Оценка надежности отказоустойчивых виртуальных кластеров / Е. С. Горбачева, М. М. Олигова, В. А. Ландышев // Наукосфера. – 2020. – № 1. – С. 19–22.

References

1. Bondarenko, V. N. The impact of IT industry development on service sector transformation in the digital economy. *Modern problems of tourism and service: collection of scientific papers from the 5th All-Russian scientific-practical conference, Moscow, April 28, 2022*. Moscow, Russian State University of Tourism and Service, 2022, 18–27 (In Russ.).
2. Sabitova, E. M., Amirova, E. F., Gazetdinov, Sh. M. Prospects for the Development of Information Infrastructure. *Current issues of accounting and auditing in the context of strategic economic development: proceedings of the All-Russian (national) scientific-practical conference of young scientists*. Kazan, Kazan State Agrarian University, 2023, pp. 470–476 (In Russ.).
3. Kornienko, D. V., Melnikov, M. O., Ivannikov, I. S. Automation of IC server startup using container virtualization tools. *Technical and Technological Problems of Service*, 2022, no. 1 (59), pp. 58–62 (In Russ.).
4. Nikolaevsky, N. O. Performance issues of IC: Enterprise configurations and the role of devops in their optimization. *Theory and practice in a changing global world: proceedings of the international interuniversity scientific-practical conference*, Saint Petersburg, Saint Petersburg Center for Systems Analysis, 2024, pp. 44–49 (In Russ.).
5. Savin, G. I., Pogorelko, K. P. Organization of Search in a Database with Related Entities. *Software Products and Systems*, 2022, no. 4, pp. 524–531 (In Russ.).
6. Kordyukov, R. Yu., Dopira, R. V., Ivanova, A. V., Abu-Abed, F. N., Martynov, D. V. Model and algorithmization of the assignment optimization problem with additional constraints. *Software Products and Systems*, 2016, vol. 29, no. 2, pp. 16–22 (In Russ.).
7. Ivannikov, I. S. The Gilaev Test and the APDEX methodology as tools for testing IC platforms. *Continuum. Mathematics. Informatics. Education*, 2021, no. 1 (21), pp. 80–88. DOI: 10.24888/2500-1957-2021-1-80-88 (In Russ.).
8. Zaruchevskaya, G. V., Ermolin, I. A. Limitations of the APDEX method in evaluating the performance of IC-based systems. *Development of modern science and technology in the context of transformational processes: proceedings of the XII international scientific-practical conference*. Saint Petersburg, Pechatny Tsek, 2023, pp. 43–46 (In Russ.).
9. Tryasolobov, A. V. File-based and client-server approaches to database implementation in the IC: Enterprise environment. *Problems and prospects for the development of regional agriculture: proceedings of the interuniversity student scientific-practical conference*. Perm, IPC “Prokrost” 2023, pp. 424–427 (In Russ.).
10. Mustafayev, N. G., Bashtannik, N. A., Baybikov, N. R., Ponomarenko, A. A. Managing software product development for information systems of advanced special-purpose systems and complexes. *Integration of science, society, production and industry: challenges and prospects: monograph*. Ufa, Aeterna Publ., 2024, pp. 39–51 (In Russ.).
11. Danilin, D. D., Martyshkin, A. I., Danilov, E. A. Virtualization of Computing Machines and Data Centers in Computer Networks. *Trends in the Development of Science and Education*, 2023, no. 97–12, pp. 58–60 (In Russ.).
12. Bogatyrev, V. A., Aleksankov, S. M., Derkach, A. N. Reliability Model of a Fault-Tolerant Cluster with Virtual Machine Migration. *Software Products and Systems*, 2019, no. 1, pp. 103–108 (In Russ.).
13. Gorbacheva, E. S., Oligova, M. M., Landyshev, V. A. Reliability Assessment of fault-tolerant virtual clusters. *Naukosfera*, 2020, no. 1, pp. 19–22 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 01.04.2026; принята к публикации 03.04.2026.

The article was submitted 10.02.2026; approved after reviewing 01.04.2026; accepted for publication 03.04.2026.

УДК 519.254

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.005

**АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ (RIS)**

Соловьев Владимир Анатольевич, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4, доцент, ORCID: 0009-0004-9158-751X, e-mail: volodimer@bmstu.ru

Горелкин Андрей Владимирович, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4, бакалавр, ORCID: 0009-0003-6722-7058, e-mail: agorelkin1@gmail.com

Бардадым Сергей Олегович, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4, бакалавр, ORCID: 0009-0008-7018-7890, e-mail: sergei_forstudy@mail.ru

Тураносов Эдуард Дмитриевич, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4, бакалавр, ORCID: 0009-0004-7982-237X, e-mail: turanosoveduard@gmail.com

Предметом исследования являются процессы управления электромагнитным окружением в сетях связи пятого и шестого поколений. Тема работы сосредоточена на оптимизации алгоритмов пространственно-временной обработки для интеллектуальных реконформируемых поверхностей (RIS). Цель исследования заключается в разработке и анализе эффективных методов управления пассивными метаэлементами RIS для минимизации вычислительной сложности при сохранении высокой пропускной способности. В качестве методологии использовано сочетание методов математического снижения размерности, в частности усеченного сингулярного разложения (SVD) на базе теоремы Экарта – Янга, и итеративного градиентного спуска. Результаты компьютерного моделирования системы ММО 8 x 8 подтвердили, что ограничение сингулярного базиса до 2–4 векторов сокращает время вычислений на 40 % при потере пропускной способности не более 10 %. Более того, применение частотно-зависимых весовых коэффициентов с кусочно-линейной интерполяцией обеспечило эффективное подавление широкополосных помех. Следовательно, предложенные подходы позволяют стабилизировать отношение сигнал/шум и снизить вероятность битовой ошибки (BER) в динамических сценариях. В результате работы сделан вывод, что интеграция методов слепой адаптации и снижения размерности делает пассивные RIS пригодными для использования в высокоскоростных мобильных и аэрокосмических комплексах. Область применения результатов охватывает проектирование аппаратных платформ для современных инфокоммуникационных систем с ограниченными вычислительными ресурсами.

Ключевые слова: интеллектуальные реконформируемые поверхности, RIS, пространственно-временная обработка, сингулярное разложение, алгоритмы сверхразрешения, подавление помех, сети 6G, ММО

**SPATIOTEMPORAL DATA PROCESSING ALGORITHMS
FOR RECONFIGURABLE INTELLIGENT SURFACES (RIS)**

Solovyov Vladimir A., Bauman Moscow State Technical University, 5, bld. 4 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation,

Associate Professor, ORCID: 0009-0004-9158-751X, e-mail: volodimer@bmstu.ru

Gorelkin Andrew V., Bauman Moscow State Technical University, 5, bld. 4 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation,

bachelor, ORCID: 0009-0003-6722-7058, e-mail: agorelkin1@gmail.com

Bardadym Sergei O., Bauman Moscow State Technical University, 5, bld. 4 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation,

bachelor, ORCID: 0009-0008-7018-7890, e-mail: sergei_forstudy@mail.ru

Turanosov Eduard D., Bauman Moscow State Technical University, 5, bld. 4 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation,

bachelor, ORCID: 0009-0004-7982-237X, e-mail: turanosoveduard@gmail.com

The study addresses the management of electromagnetic environments within fifth and sixth-generation communication networks. Specifically, the research focuses on optimizing spatiotemporal processing algorithms for Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS). The primary objective is to develop and evaluate efficient control methods for passive RIS meta-elements to mitigate mathematical complexity while maintaining high data rates. The adopted methodology integrates mathematical dimensionality reduction techniques, particularly Truncated Singular Value Decomposition (SVD) based on the Eckart-Young theorem, with iterative gradient descent. Simulation results for an 8 x 8 MIMO system demonstrate that restricting the singular basis to 2–4 vectors reduces computational time by 40 %, while the throughput degradation remains below 10 %. Moreover, the implementation of frequency-dependent weight coefficients combined with piecewise linear interpolation facilitates robust broadband interference cancellation. Consequently, the proposed approaches stabilize the signal-to-noise ratio

and reduce the Bit Error Rate (BER) even in highly dynamic scenarios. As a result, the study concludes that combining blind adaptation with dimensionality reduction renders passive RIS viable for high-speed mobile and aerospace communication systems. The benefits of this study extend to the architectural design of digital platforms for next-generation infocommunications operating under strict resource constraints.

Keywords: reconfigurable intelligent surfaces, RIS, spatiotemporal processing, SVD, super-resolution algorithms, interference cancellation, 6G networks, MIMO

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап эволюции инфокоммуникационных технологий и сетей связи пятого и шестого поколений неразрывно связан с внедрением принципиально новых подходов к управлению электромагнитным окружением. Одной из наиболее смелых и перспективных аппаратных парадигм по праву признаны интеллектуальные реконфигурируемые поверхности (Reconfigurable Intelligent Surfaces, сокращенно RIS). Данное техническое решение представляет собой масштабный двумерный массив, состоящий из сотен или даже тысяч миниатюрных пассивных метазлементов. Каждый такой элемент способен программно изменять фазу и амплитуду отражённой электромагнитной волны. Это даёт возможность целенаправленно формировать узкие лучи диаграммы направленности, изящно обходить физические препятствия и создавать виртуальные линии прямой видимости между передатчиком базовой станции и абонентским терминалом. Однако с ростом числа отражающих ячеек экспоненциально возрастает математическая сложность вычисления оптимальных параметров. Для эффективного управления отражёнными сигналами в многолучевой среде требуется глубокая пространственно-временная обработка, которая ранее применялась исключительно в дорогих активных фазированных антенных решётках. Адаптация классических алгоритмов для пассивных RIS является нетривиальной проблемой из-за отсутствия собственных усилительных трактов на каждом элементе и необходимости непрерывной оценки огромных канальных матриц в режиме реального времени.

Цель работы – разработка и детальный анализ эффективных алгоритмов пространственно-временной обработки данных для управления интеллектуальными поверхностями в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

Для достижения поставленной цели были сформулированы три ключевые задачи:

- 1) проанализировать существующие методы пространственно-временной фильтрации и оценки параметров радиосигналов в многоэлементных антенных системах;
- 2) предложить алгоритмический метод снижения вычислительной сложности при настройке матрицы коэффициентов отражения RIS для динамичных многолучевых каналов связи;
- 3) оценить результативность адаптивных алгоритмов подавления широкополосных помех при использовании интеллектуальных поверхностей в нестабильной среде.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ РАБОТЫ

Анализ профильной литературы показывает, что базовые математические принципы пространственно-временной обработки весьма глубоко проработаны для классических радиолокационных и телекоммуникационных комплексов. В частности, в работе А. П. Алёшкина и соавторов детально описан метод повышения углового разрешения на основе последовательной обработки с использованием алгоритмов сверхразрешения типа MUSIC и Capon. Они позволяют уверенно обойти релеевский предел за счёт спектрального разделения сигнального и шумового подпространств [1, с. 38]. Вопросы обнаружения малозаметных целей на фоне интенсивных помех с применением функционала правдоподобия и сложных векторов корреляционных интегралов подробно изложены И. К. Антоновым и А. А. Лавровым [2, с. 735]. Аппаратная реализация тяжёлых алгоритмов цифровой фильтрации на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и сигнальных процессоров детально раскрыта И. И. Марковичем и Е. И. Коваленко [3, с. 54]. А. И. Таганов и коллеги уделили особое внимание помехоустойчивому приёму информации за счёт адаптивной пространственной оптимизации в аэрокосмической отрасли [4, с. 67]. Проблема обработки именно широкополосных сигналов, требующая расчёта частотно-зависимых комплексных весовых коэффициентов, всесторонне разобрана в трудах А. Н. Дементьева [5, с. 7]. Что касается непосредственно интеллектуальных поверхностей, И. Буртаковым и А. Куреевым предложен весьма эффективный метод снижения размерности канальных матриц на основе усечённого сингулярного разложения [6, с. 654]. Наконец, алгоритмы слепой пространственной фильтрации с использованием метода наименьших средних квадратов для цифровых линий связи отлично представлены в трудах молодых учёных БГУИР [7, с. 180].

Несмотря на обширную теоретическую базу, прослеживается очевидный научный пробел: подавляющее большинство авторов рассматривают исключительно активные антенные системы, где каждый излучатель снабжён собственным радиочастотным трактом. Прямой перенос градиентных методов и алгоритмов сверхразрешения на пассивные RIS сопряжён с проблемой колоссальных вычислительных затрат, поскольку оптимизация должна проводиться для сложнейших каскадных

каналов. Представленная работа призвана заполнить этот пробел путём изящной интеграции методов математического снижения размерности и адаптивной градиентной фильтрации.

Основу используемой физической модели составляет каскадный радиотракт. Сигнал, принимаемый конечным устройством, представляет собой математическую суперпозицию прямой волны и волны, отражённой от поверхности. Полная матрица канала описывается суммой матрицы прямого пути и произведения матриц канала от базовой станции до поверхности, диагональной матрицы фазовых сдвигов и матрицы канала от поверхности до абонента. Для максимизации пропускной способности радиоканала по строгому критерию Шеннона применён известный алгоритм распределения мощности, часто называемый «заполнением водой». Чтобы избежать прямого обращения матриц колоссальной размерности, задействован метод усечённого сингулярного разложения (SVD) на базе теоремы Экарта – Янга. В качестве рабочего базиса оставались только несколько старших сингулярных чисел. Для результативного подавления мощных широкополосных помех использован метод градиентного спуска, обновляющий весовые коэффициенты итеративно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе практической реализации предложенных методов было выполнено объёмное компьютерное моделирование в программной среде. Рассматривалась многоантенная MIMO-система размерностью 8×8 , в которой телекоммуникационная связь между приёмопередатчиками обеспечивалась исключительно через RIS, состоящую из четырёхсот отражающих пассивных элементов (сетка 20×20). Центральная рабочая частота задавалась равной 5,3 ГГц, что абсолютно типично для современных высокоскоростных стандартов беспроводной локальной связи. Для правдоподобной имитации сложной электромагнитной обстановки в модель вводились источники аддитивного белого гауссовского шума и пространственно-распределённые генераторы широкополосных помех. Диапазон отношения сигнал/шум варьировался от 7 до 45 децибел.

Первый этап вычислений касался оценки результативности метода снижения размерности при тонкой настройке фазовых состояний RIS. Расчёт оптимальной ковариационной матрицы передачи и матрицы отражения традиционно требует выполнения огромного множества итераций, вычислительная сложность которых кубически зависит от числа метаэлементов. Внедрение усечённого сингулярного разложения позволило кардинально и бесповоротно изменить эту ситуацию. Выяснилось, что при сохранении всего четырёх старших сингулярных чисел из всего огромного спектра канальной матрицы алгоритм настройки достигает пропускной способности, отличающейся от теоретического максимума не более чем на пять процентов [6, с. 655]. Если пойти на более радикальное усечение и сократить базис всего до двух сингулярных чисел, потеря в максимальной пропускной способности возрастает до десяти процентов. Взамен время выполнения алгоритма настройки сокращается сразу на сорок процентов. В условиях быстро меняющегося радиоканала это даёт критическое преимущество. Платформа получает уникальную способность пересчитывать коэффициенты отражения быстрее, чем изменяется время когерентности эфира. Оценка асимптотической сложности модифицированного алгоритма убедительно подтвердила снижение вычислительной нагрузки с неподъёмной кубической до вполне приемлемой линейно-квадратичной.

На втором этапе скрупулёзно оценивалась способность RIS формировать глубокие пространственные «нули» в направлении источников широкополосных помех. В классической теории адаптивных антенных решёток для этого требуется постоянный расчёт обратной корреляционной матрицы помеховых сигналов [2, с. 735]. Однако для широкополосного сигнала, ширина спектра которого сопоставима с несущей частотой, диаграмма направленности существенно искажается, и один набор статических весовых коэффициентов не способен обеспечить подавление помехи во всей полосе. Вследствие этого был применён метод формирования частотно-зависимого вектора. Весь рабочий диапазон частот разбивался на ряд узких частотных интервалов, внутри которых рассчитывались локальные оптимальные комплексные веса. Плавный переход между расчётными точками обеспечивался за счёт применения кусочно-линейной интерполяции [5, с. 9]. Для наглядной демонстрации найденного технического компромисса между вычислительной сложностью и результирующей пропускной способностью радиоканала была сформирована детализированная сводка данных. В качестве опорного стенда рассматривалась система MIMO конфигурации 8×8 с центральной рабочей частотой 5,3 ГГц и панелью RIS, состоящей из 400 независимых элементов. В таблице 1 приведены строгие показатели относительной пропускной способности, выраженные в процентах от теоретического предела Шеннона, а также параметры затрачиваемого времени на расчёт фазовых состояний и асимптотической сложности алгоритма.

Таблица 1 – Сравнение пропускной способности и вычислительной сложности алгоритма настройки RIS в зависимости от размерности усечённого сингулярного базиса

Размерность сингулярного базиса (k)	Относительная пропускная способность, %	Сокращение времени вычислений, %	Рекомендуемый сценарий практического применения
Полная матрица (k = 8)	100	0	Теоретический предел ёмкости / офлайн-расчёт
k = 4	95,2	13,4	Стационарная высокоскоростная передача данных
k = 2	89,7	40,1	Динамичная мобильная связь с быстро движущимися объектами
k = 1	74,3	68,5	Аварийные ситуации и критический дефицит энергоресурсов

Примечание. В качестве абсолютного базового значения (100 % времени) принят классический алгоритм полного матричного перемножения без усечения размерности.

Применение градиентного алгоритма обновления весов продемонстрировало впечатляющую математическую устойчивость. На каждом отдельном шаге вектор фазовых сдвигов элементов RIS корректировался строго в направлении антиградиента целевой функции. Моделирование сложного динамического сценария показало, что градиентный метод с кусочно-линейной аппроксимацией блестяще успевает перестраивать диаграмму направленности поверхности прямо в процессе движения целевого объекта. Переходный процесс формирования «нуля» в направлении источника помехи занимал ничтожные доли миллисекунд. В итоге отношение сигнал/шум на приёме удалось стабилизировать на уровне, гарантирующем безошибочную демодуляцию. Переход к итеративным методам, например градиентному, отражает интеллектуализацию инженерных расчётов. Ранее была доказана эффективность нейронных сетей в анализе сложных систем в строительстве [8, с. 24–28]. Их адаптация для управления фазовыми состояниями RIS снижает вычислительные затраты в динамических средах.

Третий этап расчётов включал строгую проверку алгоритмов слепой пространственной обработки, работающих без априорного знания точной обучающей последовательности. Был протестирован рекурсивный стохастический слепой алгоритм по критерию наименьших средних квадратов (LMS) [7, с. 180]. Главным показателем эффективности выступала вероятность битовой ошибки (BER). Оказалось, что применение слепого алгоритма в грамотном сочетании с оптимизированной поверхностью позволяет снизить этот показатель до уровней порядка одной миллионной доли даже при начальном отношении сигнал/шум около десяти децибел. Использование алгоритмов слепой адаптации оказалось крайне перспективным именно для пассивных RIS, так как природа метаэлементов сильно затрудняет передачу выделенных калибровочных пилот-сигналов. Анализ полученных сигнальных созвездий на выходе схемы Костаса показал изумительно чёткое разделение позиционных символов, что неопровержимо подтверждает превосходную корректность настройки элементов отражающей поверхности. В процессе масштабной симуляции проверялись несколько конкурирующих алгоритмов адаптации комплексных весовых коэффициентов: рекурсивный стохастический слепой алгоритм на базе наименьших средних квадратов (LMS, A1), его жёсткая модификация с фиксированным временем адаптации (A2), алгоритм прямого обращения выборочной матрицы (DMI, A3) и крайне ресурсоёмкий метод на основе анализа собственных векторов корреляционной матрицы (A4). Моделирование проводилось для сигнала BPSK с применением согласованных фильтров типа «корень из приподнятого косинуса» (RRC) при коэффициенте скругления 0,3 и длине импульсной характеристики в 8 бит. В таблице 2 систематизированы данные о вероятности ошибки и относительных вычислительных затратах при различных уровнях отношения сигнал/шум (SNR) (рис.).

Помимо сугубо радиотехнических параметров, был выполнен анализ вычислительной архитектуры цифровой платформы. Алгоритмы сверхразрешения по угловым координатам требуют непрерывного вычисления собственных векторов [1, с. 38], что является невероятно ресурсоёмким процессом. Аппаратная оптимизация этих сложнейших процедур возможна путём использования высокоскоростных логических матриц (ПЛИС) для глубокого распараллеливания многомерных тензорных операций [3, с. 53]. Это делает интеллектуальные поверхности абсолютно пригодными для успешной интеграции в скоростные мобильные приложения и даже сложные аэрокосмические комплексы связи нового поколения [4, с. 66].

Таблица 2 – Оценка вероятности битовой ошибки (BER) для алгоритмов слепой пространственной адаптации при различных отношениях сигнал/шум (SNR)

Тип алгоритма слепой пространственной обработки	Описание метода адаптации комплексных весовых коэффициентов	BER при SNR = 10 дБ	BER при SNR = 12 дБ	BER при SNR = 14 дБ	Относительная вычислительная сложность на ПЛИС
Отсутствие адаптации	Статичная фокусировка приёмной системы строго в направлении полезного сигнала	0,496	0,215	0,084	Низкая (базовый уровень 1x)
Алгоритм A1	Рекурсивный стохастический слепой LMS-алгоритм градиентного спуска	0,224	0,041	$2,87 \cdot 10^{-7}$	Умеренная (увеличение в 3x)
Алгоритм A2	Стохастический слепой LMS-алгоритм на строго заданном окне адаптации	0,0006	$5,14 \cdot 10^{-4}$	$3,17 \cdot 10^{-5}$	Средняя (увеличение в 5x)
Алгоритм A3	Прямой слепой алгоритм по ограниченной выборке заданного объёма (DMI)	0,001	$4,22 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	Высокая (увеличение в 15x)
Алгоритм A4	Слепой алгоритм на основе вычисления собственных векторов корреляционной матрицы	0,0003	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$< 10^{-8}$	Критическая (увеличение в 40x)

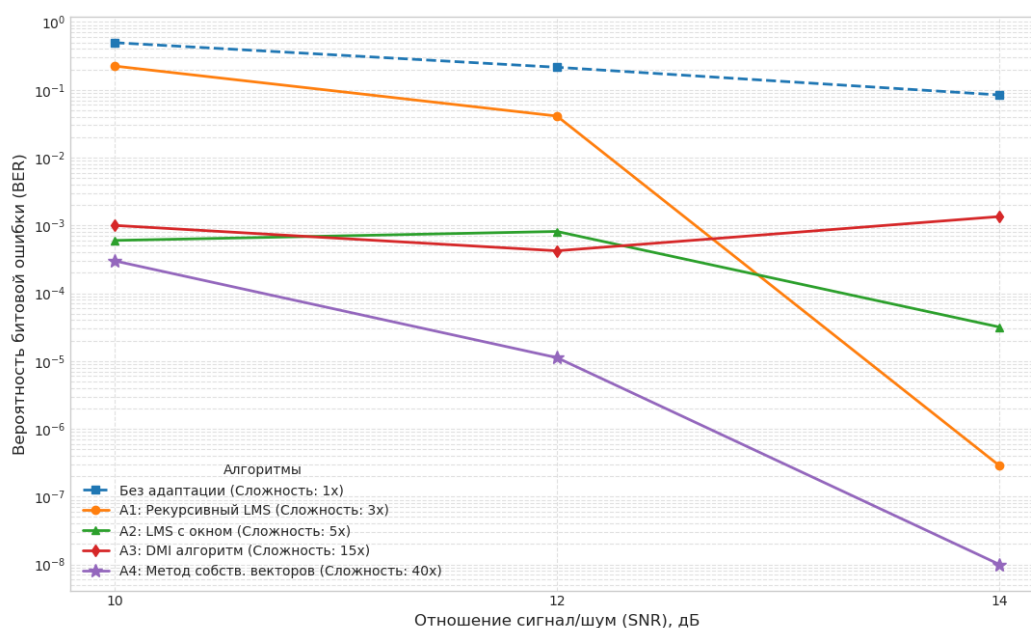


Рисунок – Сравнение слепых алгоритмов пространственной адаптации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успешная алгоритмическая реализация процедур пространственно-временной обработки данных для интеллектуальных реконфигурируемых поверхностей открывает принципиально новые, ранее недоступные возможности по глубокому управлению параметрами радиоканалов. Проведенная аналитическая работа позволяет сделать следующие уверенные выводы по ранее поставленным задачам:

1. Изучение существующих методов показало, что традиционные алгоритмы адаптивной пространственной фильтрации и сверхразрешения обладают высочайшей теоретической эффективностью, но их прямое аппаратное применение для пассивных многоэлементных RIS жёстко ограничивается чрезмерной вычислительной сложностью. Существует острая необходимость адаптации математического аппарата для изящного обхода ресурсоёмкого прямого расчёта обратных корреляционных матриц в режиме реального времени.

2. Разработан и математически обоснован метод радикального снижения размерности сложных канальных матриц на основе усечённого сингулярного разложения. Сохранение в базисе от двух до четырёх старших сингулярных чисел легко сокращает время выполнения алгоритма настройки поверхности на сорок процентов, приводя к допустимому снижению общей пропускной способности не более чем на десять процентов. Данный вычислительный подход невероятно оптимален для интеграции в цифровые аппаратные платформы с жёстко ограниченными энергоресурсами.

3. Оценка работоспособности адаптивных градиентных и слепых стохастических алгоритмов уверенно продемонстрировала их превосходную способность надёжно подавлять пространственно-распределённые широкополосные помехи. Применение уникальных частотно-зависимых весовых коэффициентов со встроенной кусочно-линейной аппроксимацией безотказно гарантирует формирование глубоких пространственных «нулей» диаграммы направленности. Это обеспечивает удержание вероятности битовой ошибки на минимально возможных значениях даже при высочайшей динамике перемещения источников мешающих сигналов в пространстве.

Список источников

1. Алешкин А. П., Метод повышения разрешающей способности и точности радиолокационных угловых измерений на основе последовательной пространственно-временной обработки принимаемых сигналов / А. П. Алешкин, В. В. Владимиров, В. И. Невзоров, П. В. Савочкин // Информационно-управляющие системы. – 2020. – № 2 (105). – С. 37–45.
2. Антонов И. К., Алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов в многолучевом радиолокаторе при обнаружении и оценивании параметров малозаметных воздушных целей / И. К. Антонов, А. А. Лавров // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63, № 7. – С. 733–736.
3. Маркович, И. И., Применение интеллектуальных вычислительных систем для реализации процедур пространственно-временной обработки сигналов в бортовых РЛС / И. И. Маркович, Е. И. Коваленко // Известия ТРТУ. – 2004. – № 9 (44). – С. 53–58.
4. Таганов, А. И., Интеллектуальные методы и технологии передачи и обработки информации аэрокосмических систем / А. И. Таганов, С. И. Гусев, А. Н. Колесенков [и др.] // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2017. – № 60. – С. 65–74.
5. Дементьев, А. Н. Развитие методов пространственно-временной обработки широкополосных сигналов в адаптивной антенной решетке / А. Н. Дементьев, Д. С. Ключев, А. Н. Новиков [и др.] // Труды МАИ. – 2022. – № 124.
6. Буртаков, И. Исследование метода снижения размерности задачи настройки реконфигурируемой интеллектуальной поверхности / И. Буртаков, А. Куреев // ИТиС 2022 : сборник трудов 46-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН, Огнково, 02–06 октября 2022 года. – Москва : Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, 2022. – С. 647–658.
7. Сай, Тун Тун. Эффективность способов слепой обработки сигналов в средствах цифровой радиосвязи с многоканальными приемными системами / Сай, Тун Тун // 61-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2025 г.) : сборник материалов. – Минск : БГУИР, 2025. – С. 176–181.
8. Гулякин, Д. В. Социально-экономические аспекты нейронных сетей в высотном строительстве / Д. В. Гулякин, Д. Д. Гринев, А. Р. Гущина, Э. А. Сылка // Экономический вестник. – 2024. – Т. 3, № 2. – С. 24–28.

References

1. Aleshkin, A. P., Vladimirov, V. V., Nevzorov, V. I., Savochkin, P. V. Method for increasing the resolution and accuracy of radar angular measurements based on sequential spatio-temporal processing of received signals. *Information and Control Systems*, 2020, no. 2 (105), pp. 37–45 (In Russ.).
2. Antonov, I. K., Lavrov, A. A. Algorithms for processing spatio-temporal signals in a multibeam radar for detecting and estimating the parameters of low-observable air targets. *Radio Engineering and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 7, pp. 733–736 (In Russ.).
3. Markovich, I. I., Kovalenko E. I. Application of intelligent computing systems for the implementation of procedures for spatio-temporal signal processing in airborne radars. *Bulletin of TRTU*, 2004, no. 9 (44), pp. 53–58 (In Russ.).
4. Taganov, A. I., Gusev, S. I., Kolesenkov, A. N. [et al.] Intelligent methods and technologies for transmitting and processing information in aerospace systems. *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University*, 2017, no. 60, p. 65–74 (In Russ.).
5. Demytyev, A. N., Klyuev, D. S., Novikov, A. N. [et al.] Development of Methods for Spatio-Temporal Processing of Broadband Signals in an Adaptive Antenna Array. *Proceedings of MAI*, 2022, no. 124 (In Russ.).
6. Burtakov, I., Kureev, A. Study of a Method for Reducing the Dimensionality of the Problem of Tuning a Reconfigurable Smart Surface. *ITiS 2022: Proceedings of the 46th Interdisciplinary School-Conference of the IITP RAS, Ognikovo, October 2–6, 2022*. Moscow, A.A. Kharkevich Institute for Information Transmission Problems of RAS, 2022, pp. 647–658 (In Russ.).
7. Sai, Tong Tong, Efficiency of Blind Signal Processing Methods in Digital Radio Communications with Multi-channel Receiving Systems. *61st Scientific Conference of Postgraduate, Master's, and Undergraduate Students of BSUIR (Minsk, 2025): Collection of Materials*. Minsk, BSUIR, 2025, pp. 176–181 (In Russ.).
8. Gulyakin, D. V., Grinev, D. D., Gushchina, A. R., Sylka, E. A. Socio-economic aspects of neural networks in high-rise construction. *Economic Bulletin*, 2024, vol. 3, no. 2, pp. 24–28 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 06.04.2026; одобрена после рецензирования 15.04.2026; принята к публикации 17.04.2026.

The article was submitted 06.04.2026; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 17.04.2026.

УДК 303.732.4

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЦЕПТУРОЙ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ

Пономарев Дмитрий Сергеевич, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7; ФКУ НИИ ФСИН России, Российская Федерация, 125130, Москва, ул. Нарвская, 15а, стр. 1, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0003-1562-2956

В статье рассматривается задача прогнозного управления технологическим процессом производства чистящих, моющих и дезинфицирующих средств в условиях изменчивости характеристик сырья, нестабильности технологических режимов и наличия нелинейных взаимосвязей между параметрами процесса и показателями качества продукции. Отмечается, что традиционные методы управления рецептурой, основанные на регламентных зависимостях и экспертных правилах, обладают ограниченной устойчивостью при работе с многомерными временными данными и не обеспечивают требуемой точности при изменении условий производства. Целью работы является разработка метода обработки данных и построения прогнозной модели, обеспечивающей устойчивое определение дозировок компонентов рецептуры на основе анализа многомерных временных рядов. Предложенный подход включает формирование входных последовательностей, переход к латентному представлению пониженной размерности, моделирование временной динамики и расчёт прогнозных значений управляемых параметров. Экспериментальная апробация метода выполнена на данных производственного мониторинга (в качестве примера были рассмотрены данные производств пенитенциарной системы). Полученные результаты показывают снижение ошибок прогнозирования по сравнению с базовой моделью, а также повышение устойчивости модели при изменении характеристик сырья и технологических режимов. В статье была дополнительно представлена возможность метода формировать согласованные значения рецептурных параметров с учётом технологических ограничений. Научная новизна работы заключается в разработке метода прогнозного управления рецептурными параметрами химического производства, основанного на гибридации методов обработки многомерных временных рядов и латентного представления данных. Практическая значимость определяется возможностью применения предложенного подхода в системах поддержки принятия решений для повышения стабильности технологических процессов и эффективности использования сырьевых ресурсов.

Ключевые слова: прогнозное управление, рецептура химического производства, многомерные временные ряды, временные данные, нейронные сети, интеллектуальный анализ данных

A SYSTEMATIC APPROACH TO CONSTRUCTING HYBRID NEURAL NETWORK MODELS FOR PREDICTIVE CONTROL OF WATER TREATMENT

Ponomarev Dmitry S., Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, 7 Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russian Federation; Research Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, 15a, bldg. 1 Narvskaya St., Moscow, 125130, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0003-1562-2956

This article addresses the problem of predictive control for the manufacturing process of cleaning, washing, and disinfecting agents, specifically under conditions characterized by variability in raw material properties, instability in process operating modes, and the presence of nonlinear interdependencies between process parameters and product quality indicators. It is noted that traditional formulation control methods—which rely on prescribed functional relationships and expert-derived rules—exhibit limited robustness when handling multivariate time-series data and fail to deliver the requisite accuracy when production conditions change. The objective of this study is to develop a method for data processing and predictive model construction that enables the robust determination of formulation component dosages based on the analysis of multivariate time series. The proposed approach involves the generation of input sequences, a transformation into a lower-dimensional latent representation, the modeling of temporal dynamics, and the calculation of predictive values for the controlled parameters. The method was experimentally validated using real-world production monitoring data. The results obtained demonstrate a reduction in prediction errors compared to a baseline model, as well as enhanced model robustness in the face of variations in raw material properties and process operating modes. Furthermore, the study demonstrates the method's capability to generate mutually consistent values for formulation parameters while adhering to technological constraints. The scientific novelty of this work lies in the development of a predictive control method for chemical manufacturing formulation parameters, based on the integration of multivariate time-series analysis techniques and latent data representation. The practical significance of the study is defined by the potential to apply the proposed approach within decision support systems to enhance the stability of technological processes and improve the efficiency of raw material utilization.

Keywords: predictive management, chemical production formulation, multivariate time series, time data, neural networks, data mining

ВВЕДЕНИЕ

Производство чистящих, моющих и дезинфицирующих средств относится к числу сложных технологических процессов, в которых качество конечной продукции определяется совокупным влиянием характеристик исходного сырья, точности дозирования компонентов, режимов смешивания, температурных условий, продолжительности технологических операций и параметров промежуточного контроля.

В реальных условиях производства чистящих, моющих и дезинфицирующих средств технологический процесс существенно отличается от тех упрощённых рецептурных схем, которые используются в нормативных расчётах. На практике одновременно действует большое количество факторов, между которыми формируются сложные, зачастую нелинейные взаимосвязи. Кроме того, параметры процесса чувствительны даже к незначительным изменениям технологических условий. В результате поддержание стабильного состава продукции и её потребительских свойств становится нетривиальной задачей [1].

Особенно заметно это проявляется на производствах химических средств, функционирующих в пенитенциарной системе. Здесь технологический процесс протекает в условиях ограниченных ресурсов, при необходимости строгого соблюдения требований безопасности и с учётом специфики организации труда. Дополнительное влияние оказывают неравномерная загрузка оборудования и вариативность производственных условий [2, 3]. В таких условиях устойчивость технологического режима становится критически важной: от неё зависят как экономические показатели, так и возможность получения продукции с требуемыми эксплуатационными и санитарно-гигиеническими характеристиками.

Использование только регламентных зависимостей, фиксированных рецептур и корректировок, которые задаются на основе практического опыта, не всегда позволяет получить ожидаемый результат. Это особенно заметно при смене партий сырья, колебаниях производственной нагрузки или в переходных режимах работы. В подобных ситуациях поведение процесса выходит за рамки типовых предположений, и традиционные подходы могут давать ощутимые погрешности [3, 4].

Практика производства чистящих, моющих и дезинфицирующих средств показывает, что традиционные подходы к управлению рецептурой и технологическими параметрами, основанные на нормативных зависимостях и локальном опыте специалистов, не всегда позволяют своевременно учитывать динамический характер процесса. Это может приводить к перерасходу компонентов, отклонениям по вязкости, плотности, кислотно-щелочным характеристикам, моющей способности, устойчивости состава и другим показателям качества. Аналогичные ограничения характерны и для классических статистических и регрессионных моделей [5], чувствительных к шумам измерений, взаимной зависимости признаков и изменению структуры временных рядов производственного мониторинга.

Развитие методов машинного обучения и интеллектуального анализа данных создаёт предпосылки для построения более гибких средств прогнозного управления технологическими процессами. Использование многомерных временных рядов, отражающих динамику состояния оборудования, характеристик сырья, параметров рецептуры и показателей качества, позволяет перейти от статического описания технологического объекта к его формализованному динамическому представлению. Вместе с тем прямое применение моделей на основе обученных нейронных сетей (далее – ИНС) к исходным производственным данным не всегда позволяет обеспечить требуемую устойчивость, поскольку такие данные могут содержать шумы, пропуски, выбросы, скрытые корреляции и неоднородности, обусловленные различиями между производственными партиями и режимами функционирования [6].

В связи с этим актуальной является задача разработки формализованных методов прогнозного управления производством чистящих, моющих и дезинфицирующих средств, ориентированных на обработку многомерных временных рядов и выявление устойчивых закономерностей технологической динамики. Такие методы должны обеспечивать возможность прогнозирования ключевых управляемых параметров процесса, учитывать взаимосвязи между рецептурными компонентами и показателями качества продукции, а также сохранять работоспособность при изменении условий функционирования производственной системы.

Целью настоящей работы является разработка и исследование метода обработки данных и построения прогнозной модели для задач прогнозного управления производством чистящих, моющих и дезинфицирующих средств. В рамках работы формулируется постановка задачи прогнозирования по многомерным временным рядам, описывается процедура формирования обучающей выборки и метод моделирования временной динамики, а также проводится вычислительный эксперимент, демонстрирующий эффективность предложенного подхода по сравнению с базовой моделью.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Объектом исследования является технологический процесс производства чистящих, моющих и дезинфицирующих средств, рассматриваемый как динамическая многопараметрическая система с управляемыми воздействиями и наблюдаемыми состояниями. В качестве управляемых воздействий выступают дозировки рецептурных компонентов, а также режимные параметры технологического

процесса (время перемешивания, температурные условия, последовательность ввода компонентов). Наблюдаемые состояния характеризуются физико-химическими параметрами сырья, промежуточных смесей и готовой продукции, включая показатели вязкости, плотности, кислотно-щелочного баланса, концентрации активных веществ и другие технологически значимые характеристики.

В рамках вычислительного эксперимента был использован набор данных, структура которого соответствует типовым данным производственного мониторинга химических производств, включая производства, функционирующие в условиях пенитенциарной системы. Объём выборки для исследования составлял 1012 точек, которые были собраны в период с 2019 по 2022 г. на основе деятельности производств чистящих, моющих и дезинфицирующих средств, организованных в пенитенциарной системе.

Используемый набор обладал свойствами: наличием производственных циклов, вариативностью параметров сырья между партиями, зашумлённостью, присутствием выбросов. Были также отмечены наличие мультиколлинеарности признаков и переходные режимы при изменении рецептуры или технологических условий.

Собранные наблюдения по данным производств можно представить в виде многомерного временного ряда (1) [7]:

$$X = x_1, x_2, \dots, x_T, \quad x_t \in \mathbb{R}^n, \quad (1)$$

где x_t – вектор технологических параметров производства химических средств в момент времени (t);

n – число входных признаков;

T – длина временного ряда.

Управляющие воздействия задаются в виде временного ряда векторов дозировок рецептурных компонентов (2):

$$Y = y_1, y_2, \dots, y_T, \quad y_t \in \mathbb{R}^m, \quad (2)$$

где y_t – вектор дозировок компонентов в момент времени (t);

m – число прогнозируемых компонентов рецептуры.

Входные признаки включают параметры, характеризующие свойства исходного сырья, условия протекания технологического процесса, режимы работы оборудования и текущие показатели качества продукции. Целевые переменные соответствуют дозировкам компонентов рецептуры, определяющим состав и функциональные свойства производимых чистящих, моющих и дезинфицирующих средств. Для удобства анализа и интерпретации признаки были сгруппированы по функциональному назначению (сырьевые параметры, технологические режимы, показатели качества).

Для решения задачи управления прогнозами использовалось скользящее окно наблюдений длины T_w и горизонт упреждения τ . При этом для каждого момента времени (t) формировалась следующая входная последовательность (3):

$$X * t = x * t - T_w + 1, x_{t-T_w+2}, \dots, x_t \in \mathbb{R}^{T_w \times n}, \quad (3)$$

где X_t – матрица входных данных (т. е. окно наблюдений) в момент времени (t);

T_w – длина окна наблюдений.

Целевым значением является вектор дозировок компонентов на горизонте прогноза $y_{t+\tau}$ (вектор дозировок рецептурных компонентов на горизонте упреждения τ); τ – горизонт прогноза (в единицах дискретизации данных).

Таким образом, обучающая выборка имеет вид (4):

$$D = \{(X_t, y_{t+\tau}) | t = T_w, \dots, T - \tau\}, \quad (4)$$

где D – множество рассматриваемых обучающих примеров;

$t = T_w, \dots, T - \tau$ – диапазон индексов, при котором окно и прогноз определены корректно.

Перед обучением модели выполняется процедура предварительной обработки данных, характерная для промышленных временных рядов химических производств, а именно: контроль пропусков, выбросов и стандартизация данных [8, 9]. Первое – рассмотрим контроль пропусков. Для каждого признака j вводится индикатор наблюдаемости (5):

$$M_t^{(j)} \in \{0, 1\}, \quad (5)$$

где $M_t^{(j)}$ – индикатор наличия измерения признака j в момент времени (t).

Кратковременные пропуски заполнялись интерполяцией, а длительные – сезонно устойчивыми статистиками. Признаки с долей пропусков выше заданного порога были исключены из анализа.

Второе, что следует рассмотреть, – подавление выбросов. Для ограничения влияния аномальных значений применялась винзоризация по квантилям (6):

$$x_{t,clip}^{(j)} = \min \left(\max(x_t^{(j)}, Q_{q_{low}}^{(j)}), Q_{q_{high}}^{(j)} \right), \quad (6)$$

где $x_{t,clip}^{(j)}$ – ограниченное (обрезанное) значение признака j в момент времени (t);

$Q_{q_{high}}^{(j)}$ – нижний и верхний квантили распределения признака j .

Третье – стандартизация. Для стандартизации выборки была использована робастная стандартизация (7):

$$\tilde{x}_t^{(j)} = \frac{x_t^{(j)} - \text{median}(x^{(j)})}{IQR(x^{(j)}) + \varepsilon}, \quad (7)$$

где $\tilde{x}_t^{(j)}$ – является нормализованным значением признака j в определённый момент времени (t);
 $\text{median}(x^{(j)})$ – медианное значение для выбранного признака j по определённому обучающему интервалу;

ε – произвольное малое число для того, чтобы исключить деление на ноль;

$IQR(x^{(j)})$ – межквартильный размах для признака j .

Корреляция между признаками выявлялась на основе рассчитанной матрицы коэффициентов корреляции. Избыточность устранялась либо путём удаления дублирующих признаков, либо за счёт формирования латентных представлений. Это проводилось непосредственно на этапе моделирования.

Фиксируемыми параметрами были: Δt – шаг дискретизации наблюдений; T_w – длина окна; τ – установленный горизонт прогноза (в месяцах, от 1 до 3 месяцев); n – входные признаки (количество); m – число целевых переменных (в нашем случае физико-химические параметры сырья: вязкость, текучесть, кислотно-щелочной баланс и др.).

МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ

В качестве исходной информации для прогнозной модели был выбран многомерный временной ряд наблюдений (1), который отражал динамику для технологического процесса производства чистящих, моющих и дезинфицирующих средств. В качестве решения задачи прогнозного управления рецептурой химического производства на основе анализа временных данных было установлено отображение (8) [10, 11]:

$$\hat{y} * t + \tau = F * \theta(X_t), \quad (8)$$

где $\hat{y}_{t+\tau}$ – прогноз рецептурных компонентов чистящих, моющих и дезинфицирующих средств на выбранном горизонте τ ;

X_t является входной последовательностью некоторых наблюдений длины T_w ;

θ – использованные параметры модели.

Также было поставлено условие: для снижения влияния шумовых компонентов и одновременного сокращения размерности исходных признаков следует ввести преобразование входной последовательности в латентное пространство. Данное преобразование можно описать следующим соотношением (9):

$$Z_t = G(X_t), \quad (9)$$

где $Z_t \in \mathbb{R}^{T'_w \times d}$ является латентным представлением входных данных в момент времени t ;

d – размерность латентного пространства;

T'_w – длина латентной последовательности.

Полученное представление не только позволяет уменьшить избыточность исходных данных, но и позволяет удержать временную структуру, а также взаимосвязи между параметрами, которые являются значимыми для дальнейшего анализа. Далее проводимая обработка уже связана с моделированием динамики процесса непосредственно в самом латентном пространстве. Для этого используется оператор (10):

$$U_t = H(Z_t), \quad (10)$$

где U_t отражает изменение скрытых состояний системы и позволяет учитывать зависимости различной протяжённости, причём как на малых интервалах времени, так и на более длительных участках наблюдения. Таким образом, поскольку для последующих вычислений требуется фиксированное по размерности описание, применяется процедура агрегирования (11):

$$h_t = \Phi(U_t), \quad (11)$$

где h_t – это агрегированный вектор признаков в момент времени (t).

Далее итоговый прогноз дозировок рецептурных компонентов для чистящих, моющих и дезинфицирующих средств вычисляется как отображение представления (12):

$$\hat{y}_{t+\tau} = W h_t + b, \quad (12)$$

где W и b – обучаемые параметры выходного слоя ИНС. В результате полученные прогнозные значения можно интерпретировать как рекомендуемые значения исследуемых параметров компонентов рецептуры при производстве дезинфицирующих и моющих средств.

Обучение модели осуществлялось путём минимизации функции ошибки прогнозирования (13) [12]:

$$L * pred = \|y * t + \tau - \hat{y}_{t+\tau}\|_2^2, \quad (13)$$

где $y_{t+\tau}$ – фактические значения дозировок компонентов на горизонте прогноза τ .

Минимизация функции потерь проводилась на обучающей выборке с контролем обобщающей способности модели на валидационном интервале. В процессе обучения учитывалась необходимость

обеспечения устойчивости модели к изменению характеристик сырья вариативности технологических режимов. Также учитывалось наличие шумов в данных производственного мониторинга.

Предложенный метод включает следующие этапы:

- формирование входных последовательностей фиксированной длины;
- преобразование данных в латентное пространство пониженной размерности;
- моделирование временной динамики технологического процесса в латентном представлении;
- агрегирование временной информации;
- вычисление прогноза дозирок рецептурных компонентов на заданном горизонте.

Таким образом, предложенный метод обработки данных и построения прогнозной модели ориентирован на обеспечение устойчивого и согласованного прогнозирования параметров рецептуры в условиях многомерности, нелинейности и изменчивости технологического процесса производства чистящих, моющих и дезинфицирующих средств.

ПРОЦЕСС ОБУЧЕНИЯ И НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Исходный временной ряд длины T разделяется на обучающий и тестовый интервалы без перемешивания: обучающая выборка: $t = 1, \dots, T_{train}$; тестовая выборка: $t = T_{train} + 1, \dots, T$.

Формирование обучающих примеров выполняется по схеме скользящего окна, описанной в разделе 2, что исключает утечку информации о будущих значениях.

Обучение модели осуществляется путём минимизации функции ошибки прогнозирования на обучающей выборке. Оптимизация параметров модели θ выполняется итеративно с использованием градиентных методов. На каждой итерации вычисляется градиент функции потерь по параметрам модели ИНС и производится их обновление (14):

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} - \eta \nabla_{\theta} L_{pred}, \quad (14)$$

из (14) следуют настраиваемые гиперпараметры для обучения: η – шаг обучения; k – номер итерации. Как правило, для предотвращения переобучения и повышения устойчивости модели используется регуляризация на параметры (15):

$$L = L_{pred} + \lambda |\theta|_2^2, \quad (15)$$

где λ – коэффициент регуляризации (причём L2-регуляризацию применять будет предпочтительнее).

Дополнительно применяется контроль сходимости по валидационной выборке. Обучение прекращается при отсутствии улучшения значения функции потерь на валидации в течение заданного числа эпох.

В нашем случае для решения поставленной задачи настраиваемыми гиперпараметрами будут: длина окна наблюдений T_w ; размерность латентного пространства d ; горизонт прогноза τ ; шаг обучения η ; коэффициент регуляризации λ .

Подбор гиперпараметров осуществляется эмпирически. Проводится на обучающей выборке с использованием временной кросс-валидации. Критерием выбора оптимальной конфигурации служит минимальное значение ошибки прогнозирования на валидационном интервале.

Для количественной оценки качества прогнозирования используются стандартные регрессионные метрики:

Среднеквадратичная ошибка (RMSE) (16):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|_2^2}, \quad (16)$$

Средняя абсолютная ошибка (MAE) (17):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|_1, \quad (17)$$

где N – число прогнозируемых наблюдений на тестовом интервале.

Таким образом, применение временного разделения данных, регуляризации и процедур настройки гиперпараметров обеспечивает получение устойчивых и практически применимых прогнозных оценок, ориентированных на поддержку принятия решений при управлении производством чистящих, моющих и дезинфицирующих средств.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для сопоставления результатов была выбрана базовая схема, основанная на многомерной регрессии. Данный подход рассматривает наблюдения как независимые и не учитывает их временную упорядоченность. В отличие от него, разработанный метод использует последовательное представление данных, благодаря чему становится возможным учитывать изменение параметров во времени, а также взаимосвязи между компонентами рецептуры. Сводные показатели точности прогнозирования представлены в таблице.

Таблица – Сравнение качества прогнозирования дозировок компонентов рецептуры

Горизонт прогноза	Модель	RMSE	MAE
1	Базовая	0,94	0,88
	Предложенный метод	0,68	0,63
2	Базовая	1,12	1,05
	Предложенный метод	0,82	0,78
3	Базовая	1,29	1,21
	Предложенный метод	0,97	0,92

В результате сопоставления было установлено, что предложенный метод в целом позволяет получить более точные прогнозы по сравнению с базовой моделью. Особенно заметна разница при краткосрочном прогнозировании: здесь уменьшение среднеквадратичной ошибки превышает четверть исходного уровня. По мере увеличения горизонта прогнозирования ошибки закономерно растут в обоих случаях, что связано с накоплением неопределённости. Тем не менее преимущество разработанного подхода при этом сохраняется.

В результате анализа распределения ошибок также можно отметить различия в поведении моделей. Для предложенного метода характерна более ровная картина отклонений и меньшая чувствительность к выбросам. Снижается число ситуаций, когда ошибка принимает значительные значения. С практической точки зрения это важно, поскольку такие отклонения могут приводить к нарушениям рецептуры и, как следствие, к ухудшению свойств готовой продукции.

Отдельно оценивалась устойчивость модели при изменении условий производства, в частности при варьировании характеристик сырья и переходе между различными партиями. В этих ситуациях предложенный метод сохранял приемлемую точность, тогда как базовая модель реагировала заметным ростом ошибки. Это позволяет говорить о более высокой адаптивности разработанного подхода к изменениям технологического процесса. В результате анализа согласованности прогнозируемых дозировок компонентов можно отметить, что предложенный метод позволяет сформировать технологически корректные соотношения между компонентами рецептуры. В отличие от независимого прогнозирования, это позволяет избежать некорректных комбинаций, которые могут привести к отклонению свойств готовой продукции от заданных параметров.

С практической точки зрения полученные результаты свидетельствуют о возможности повышения точности управления рецептурой, снижения перерасхода сырья и уменьшения вариативности характеристик выпускаемой продукции. Для производств, функционирующих в условиях пени-тенциарной системы, это дополнительно означает повышение устойчивости технологического процесса и снижение зависимости от субъективных решений операторов.

Таким образом, в ходе проведённого вычислительного эксперимента было установлено, что предложенный метод обработки данных и построения прогнозной модели позволяет обеспечить более высокую точность и устойчивость прогнозирования по сравнению с традиционными подходами. Представленный подход может быть эффективно использован в системах интеллектуальной поддержки принятия решений для управления производством чистящих, моющих и дезинфицирующих средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненного исследования была рассмотрена задача прогнозного управления рецептурными параметрами при производстве чистящих, моющих и дезинфицирующих средств. Основное внимание было уделено использованию многомерных временных рядов, которые, будучи преобразованы в латентное пространство, позволяют более компактно описывать состояние технологического процесса.

Используемый метод позволяет осуществить переход от разрозненного анализа отдельных показателей к их совместному учёту. В частности, прогнозирование выполняется сразу для нескольких компонентов рецептуры, что даёт возможность учитывать их взаимное влияние. За счёт этого формируются более согласованные значения дозировок, которые соответствуют технологическим ограничениям и особенностям процесса.

В ходе проведённых исследований было установлено, что предложенный метод позволяет получить заметное улучшение по сравнению с базовой моделью. Так, снижение среднеквадратичной ошибки в среднем составило около 20–30 %, а при краткосрочном прогнозировании превысило 25 %. При увеличении горизонта прогнозирования ошибки закономерно возрастают, однако здесь разница между моделями сохраняется.

Отдельно стоит отметить снижение числа существенных отклонений прогноза. На практике именно такие ситуации чаще всего приводят к нарушению рецептуры и ухудшению качества продукции. В данном случае подобных отклонений становится меньше, что делает использование модели более надёжным.

Таким образом, можно говорить о том, что предложенный подход позволяет обеспечить более устойчивое и согласованное управление рецептурными параметрами по сравнению с традиционными методами.

Дальнейшее развитие работы целесообразно связать с практическим внедрением модели в контуры автоматизированного управления. Помимо этого, имеет смысл расширить набор учитываемых факторов, включая экономические показатели и ограничения производственной среды.

Список источников

1. Тихонова, Ю. В. Сравнительная оценка основных технологических характеристик разработанных синтетических моющих средств / Ю. В. Тихонова, Р. Р. Хабибуллин, С. П. Ломакин, Э. С. Филатова // Башкирский химический журнал. – 2006. – Т. 13, № 5. – С. 50–52. – EDN KTWKWB.
2. Чураков, Д. Ю. Статистическая обработка данных в информационных системах УИС. Проблемы и перспективы / Д. Ю. Чураков, О. К. Бескровных, Э. А. Худатов // Информационные технологии в УИС. – 2019. – № 4. – С. 39–53. – EDN OGSMLM.
3. Чураков, Д. Ю. Роль статистики уголовно-исполнительной системы в принятии управленческих решений / Д. Ю. Чураков, Э. А. Худатов // Преступление, наказание, исправление : сборник тезисов выступлений и докладов участников IV международного пенитенциарного форума: (к 140-летию уголовно-исполнительной системы России и 85-летию Академии ФСИН России) : в 10 т., Рязань, 20–22 ноября 2019 г. – Рязань : Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний, 2019. Т. 5. – С. 429–434. – EDN LOPVAP.
4. Худатов, Э. А. Об учёте критериев надёжности систем автоматизации деятельности ФСИН России / Э. А. Худатов // Актуальные вопросы информатизации Федеральной службы исполнения наказаний на современном этапе развития уголовно-исполнительной системы : сборник материалов круглого стола, Тверь, 24 июня 2019 г. – Тверь : Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт информационных технологий Федеральной службы исполнения наказаний», 2019. – С. 105–111. – EDN PYVGXI.
5. Худатов, Э. А. Прикладные методы анализа статистики для оценки деятельности подразделений и служб УИС / Э. А. Худатов, Е. Г. Царькова ; Научно-исследовательский институт информационных технологий Федеральной службы исполнения наказаний. – Тверь : Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт информационных технологий Федеральной службы исполнения наказаний», 2019. – 194 с. – ISBN 978-5-9907183-6-4. – EDN NENNWF.
6. Манжула, В. Г. Нейронные сети Кохонена и нечеткие нейронные сети в интеллектуальном анализе данных / В. Г. Манжула, Д. С. Федяшов // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 4. – С. 108–114. – EDN NDGTWB.
7. Box, G. E. P. Time series analysis: forecasting and control / G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, G. M. Ljung. – 5th ed. – Hoboken : Wiley, 2015. – 712 p.
8. Гадасин, Д. В. Снижение размерности данных для анализа посредством метода главных компонент / Д. В. Гадасин, Л. А. Трemasова, Д. С. Калининский // Computational Nanotechnology. – 2025. – Т. 12, № 3. – С. 130–140. – DOI 10.33693/2313-223X-2025-12-3-130-140. – EDN BLPFIZ.
9. Петровский, А. Б. Снижение размерности признакового пространства: метод СОКРАТ / А. Б. Петровский // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2020. – № 2. – С. 63–77. – DOI 10.14357/20718594200205. – EDN BGTNTV.
10. Hinton G. E. Reducing the dimensionality of data with neural networks / G. E. Hinton, R. R. Salakhutdinov // Science. – 2006. – Vol. 313, № 5786. – P. 504–507. – DOI 10.1126/science.1127647.
11. Goodfellow, I. Deep learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge: MIT Press, 2016. – 775 p.
12. Kingma, D. P. Auto-encoding variational Bayes / D. P. Kingma, M. Welling // arXiv. – 2013. – URL: <https://arxiv.org/abs/1312.6114> (дата обращения: 20.02.2026).

References

1. Tikhonova, Yu. V., Khabibullin, R. R., Lomakin, S. P., Filatova, E. S. Comparative assessment of the main technological characteristics of the developed synthetic detergents. *Bashkir Chemical Journal*, 2006, vol. 13, no. 5, pp. 50–52. EDN KTWKWB (In Russ.).
2. Churakov, D. Yu., Beskrovnykh, O. K., Khudatov, E. A. Statistical data processing in information systems of the Penal System. Problems and prospects. *Information Technologies in the Penal System*, 2019, no. 4, pp. 39–53. EDN OGSMLM (In Russ.).
3. Churakov, D. Yu., Khudatov, E. A. The role of statistics of the penitentiary system in making management decisions. *Crime, punishment, correction : a collection of abstracts of speeches and reports by participants of the iv international penitentiary forum: (on the 140th anniversary of the penitentiary system of Russia and the 85th anniversary of the academy of the federal penitentiary service of Russia) : in 10 vol., Ryazan, November 20–22, 2019. Ryazan, Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service*, 2019, vol. 5, pp. 429–434. EDN LOPVAP (In Russ.).
4. Khudatov, E. A. On taking into account the reliability criteria of automation systems for the activities of the Federal Penitentiary Service of Russia. *Current issues of informatization of the Federal Penitentiary Service at the current stage of development of the penal system : collection of materials from the round table, Tver, June 24, 2019. Tver, Federal State Institution "Research Institute of Information Technology of the Federal Penitentiary Service"*, 2019, pp. 105–111. EDN PYVGXI (In Russ.).
5. Khudatov, E. A., Tsarkova E. G. *Applied methods of statistical analysis to assess the activities of divisions and services of the penal system*. Research Institute of Information Technology of the Federal Penitentiary Service.

Tver, Federal State Institution "Research Institute of Information Technology of the Federal Penitentiary Service", 2019. 194 p. ISBN 978-5-9907183-6-4. EDN NENNWF (In Russ.).

6. Manzhula, V. G., Fedyashov, D. S. Kohonen neural networks and fuzzy neural networks in data mining. *Fundamental Research*, 2011, no. 4, pp. 108–114. EDN NDGTWB (In Russ.).

7. Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., Ljung, G. M. *Time series analysis: forecasting and control*. 5th ed. Hoboken, Wiley, 2015. 712 p.

8. Gadasin, D. V., Tremasova, L. A., Kalininsky D. S. Reducing the dimensionality of data for analysis using the principal component method. *Computational Nanotechnology*. 2025. vol. 12, no. 3, pp. 130–140. DOI 10.33693/2313-223X-2025-12-3-130-140. EDN BLPFIZ (In Russ.).

9. Petrovsky, A. B. Reducing the dimensionality of feature space: the SOCRATES method. *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2020, no. 2, pp. 63–77. DOI 10.14357/20718594200205. EDN BGTNTV (In Russ.).

10. Hinton, G. E., Salakhutdinov, R. R. Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science*, 2006, vol. 313, no. 5786, pp. 504–507. DOI: 10.1126/science.1127647.

11. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. *Deep learning*. Cambridge, MIT Press, 2016. 775 p.

12. Kingma, D. P., Welling, M. Auto-encoding variational Bayes. *arXiv*, 2013. Available at: <https://arxiv.org/abs/1312.6114> (accessed 20.02.2026).

Статья поступила в редакцию 18.03.2026; одобрена после рецензирования 15.04.2026; принята к публикации 18.04.2026.

The article was submitted 18.03.2026; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 18.04.2026.

УДК 004.89

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫЯВЛЕНИЮ СМЫСЛОВОЙ И ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ АУДИОПОТОКОВ: ТИПОЛОГИЯ, УРОВНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ И МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Кузовлев Кирилл Дмитриевич, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, аспирант кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления», ORCID 0009-0003-3769-0594, e-mail: k.kuzovlev@astu.ru

Кузнецова Валентина Юрьевна, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления», ORCID 0000-0002-6954-5020, e-mail: arhelial@bk.ru

Попов Георгий Александрович, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационная безопасность», e-mail: pga_96@mail.ru

Данная статья посвящена разработке теоретических и методологических основ анализа аудиопотоков с целью выявления психоэмоционального воздействия в цифровых аудиосредах. Рассматриваются особенности аудиопотока как многокомпонентной системы, включающей акустический, паралингвистический, семантический и прагматический уровни, а также подчёркивается его высокий эмоционально-суггестивный потенциал и уязвимость восприятия. Предложена типология аудиопотоков и систематизация форм психоэмоционального воздействия, проявляющихся на когнитивном, эмоциональном, социальном и подсознательном уровнях. Представлен междисциплинарный подход, объединяющий психолингвистические, когнитивно-семиотические, информационно-коммуникационные и психоакустические методы анализа. Описана концепция построения автоматизированных систем детектирования, основанных на многоходовой нейросетевой архитектуре с раздельной обработкой акустических, лингвистических и просодических признаков и их последующей интеграцией с использованием механизмов внимания. Подчёркивается значимость учёта как структуры аудиосигнала, так и особенностей его восприятия и распространения для повышения точности и интерпретируемости результатов анализа.

Ключевые слова: аудиопоток, психоэмоциональное воздействие, статистические признаки, распознавание речи, дискурс-анализ, когнитивная семиотика, просодия, объяснимость

INTERDISCIPLINARY APPROACHES TO IDENTIFYING THE MEANING AND PSYCHOEMOTIONAL ORIENTATION OF AUDIO STREAM: TYPOLOGY, LEVELS OF IMPACT AND DETECTION METHODS

Kuzovlev Kirill D., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

graduate at the Department of Automated Information Processing and Management Systems, ORCID 0009-0003-3769-0594, e-mail: k.kuzovlev@astu.ru

Kuznetsova Valentina Yu., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Automated Information Processing and Management Systems, ORCID 0000-0002-6954-5020, e-mail: arhelial@bk.ru

Popov Georgiy A., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Information Security, e-mail: pga_96@mail.ru

This article explores the theoretical and methodological foundations of audio stream analysis for identifying psychoemotional impact in digital audio environments. It examines the characteristics of an audio stream as a multicomponent system encompassing acoustic, paralinguistic, semantic, and pragmatic levels, emphasizing its high emotional-suggestive potential and the vulnerability of perception. A typology of audio streams and a systematization of the forms of psychoemotional impact manifested at the cognitive, emotional, social, and subconscious levels are proposed. An interdisciplinary approach is presented, combining psycholinguistic, cognitive-semiotic, information-communication, and psychoacoustic analysis methods. A concept for constructing automated detection systems based on a multi-input neural network architecture with separate processing of acoustic, linguistic, and prosodic features and their subsequent integration using attention mechanisms is described. The importance of taking into account both the structure of the audio signal and the characteristics of its perception and propagation is emphasized in order to increase the accuracy and interpretability of the analysis results.

Keywords: audio stream, destructive content, audio influence, cognitive impact, psycholinguistic analysis, cognitive-semiotic analysis, psychoacoustics, prosody, manipulative discourse, audio signal processing

ВВЕДЕНИЕ

Современное информационное общество характеризуется экспоненциальным ростом объёма аудиоконтента – от музыкальных сервисов и подкастов до автоматизированных синтезаторов речи и нейросетевых голосовых помощников. В этой связи возникает необходимость теоретического осмысления феномена аудиопотока как самостоятельного канала информационно-коммуникативного взаимодействия, способного оказывать как позитивное, так и психоэмоциональное воздействие на когнитивную и эмоциональную сферу человека.

Аудиопоток представляет собой непрерывную, временно структурированную последовательность звуковых сигналов, обладающую определённой семантической, эмоциональной и акустической организацией, предназначенную для восприятия в режиме реального времени или в записанном виде. Его главной особенностью является динамичность и темпоральная сопряжённость элементов, при которой звуки и фразы не существуют изолированно, а образуют единую, эволюционирующую структуру восприятия. Это означает, что аудиопоток является не статической совокупностью звуковых элементов, а процессом, разворачивающимся во времени и оказывающим последовательное воздействие на воспринимающую систему человека [1].

В рамках лингвистико-информационной парадигмы аудиопоток может быть рассмотрен как многоуровневая система кодов, включающая акустический уровень, отражающий физические параметры звука, такие как частота, амплитуда и спектральная структура; паралингвистический уровень, включающий интонацию, тембр, паузы и ритмическую организацию речи; семантический уровень, содержащий лексико-грамматическое содержание сообщения; а также прагматический уровень, отражающий коммуникативные цели, интенции и воздействие на реципиента. Таким образом, аудиопоток представляет собой организованный коммуникативный процесс, в котором звуковые коды выполняют функции передачи, регуляции и внушения информации.

Одной из ключевых характеристик аудиопотока является его способность оказывать воздействие не только на рациональную, но и на эмоциональную и подсознательную сферы восприятия. В отличие от текстовой информации, аудиопоток воспринимается линейно и не может быть мгновенно проанализирован в полном объёме, что создаёт условия для формирования устойчивых когнитивных и эмоциональных реакций. Темп речи, интонационные контуры, тембровая окраска и динамика звука способны усиливать или ослаблять смысловое содержание сообщения, а также формировать определённое эмоциональное состояние слушателя [2].

Психолингвистический подход рассматривает аудиопоток как форму речевой деятельности, в рамках которой звук выполняет функцию носителя смысловой информации и средства воздействия. Согласно данному подходу, процесс восприятия аудиоречи включает последовательные этапы акустического анализа, фонетической идентификации, лексической интерпретации и когнитивной интеграции смысла. При этом особую роль играют просодические характеристики речи, которые могут существенно изменять интерпретацию сообщения. Интонация, темп и ритм речи способны формировать эмоциональный контекст и влиять на восприятие содержания, усиливая или трансформируя его смысл [3].

Семиотический подход рассматривает аудиопоток как знаковую систему, в которой звуковые элементы выступают в качестве носителей значений и символов. В рамках данного подхода звук рассматривается не только как физическое явление, но и как элемент культурного кода, способный передавать социальные и когнитивные смыслы. Интонационные контуры, ритмические структуры и тембровые особенности могут выступать в качестве маркеров эмоциональных состояний, коммуникативных намерений и социальных ролей. Это позволяет рассматривать аудиопоток как средство передачи не только информации, но и когнитивных и эмоциональных кодов.

Информационно-коммуникационный подход, заложенный в трудах К. Шеннона и Н. Винера, акцентирует внимание на технической стороне процесса передачи аудиоинформации. В данном контексте аудиопоток рассматривается как канал передачи сообщения, подверженный воздействию шумов, искажений и потерь. Задача анализа заключается в выявлении характеристик сигнала, позволяющих определить степень его структурной организованности, устойчивости и отклонения от нормальных моделей. Данный подход создаёт основу для разработки автоматизированных систем анализа аудиопотоков, применяемых в задачах речевого распознавания, фильтрации контента и выявления аномальных структур сигнала [4].

Психоакустический подход исследует взаимосвязь между физическими характеристиками звука и его субъективным восприятием человеком. Звук, воздействуя на слуховые рецепторы, вызывает физиологические реакции, которые затем интерпретируются мозгом как субъективные ощущения громкости, высоты и тембра. Исследования показывают, что изменение параметров звукового сигнала, включая частоту, амплитуду и длительность, способно оказывать выраженное эмоциональное и физиологическое воздействие. Это имеет особое значение при анализе аудиопотоков, в которых звуковые характеристики могут использоваться для формирования определённых эмоциональных состояний.

Социокультурный подход рассматривает аудиопоток как элемент массовой коммуникации, способный формировать общественные представления и поведенческие установки. В данном контексте аудиопотоки выступают как средство передачи идеологических, культурных и социальных смыслов. Их воздействие определяется не только содержанием сообщения, но и способом его подачи, включая тембр голоса, интонацию и ритм речи. Эти характеристики способны формировать атмосферу доверия, тревоги или подчинения, влияя на восприятие информации и её интерпретацию.

Таким образом, аудиопоток представляет собой сложное многомерное явление, включающее акустические, лингвистические, когнитивные и социокультурные компоненты. Его анализ требует комплексного подхода, объединяющего методы цифровой обработки сигналов, психолингвистики, семиотики, теории информации и психоакустики. Только интеграция данных подходов позволяет адекватно описать механизмы функционирования аудиопотока и выявить его потенциальное воздействие на когнитивные и эмоциональные процессы [5].

В таком понимании аудиопоток становится объектом междисциплинарного научного исследования, в котором звук рассматривается как носитель информации, средство коммуникации и инструмент воздействия. Его изучение создаёт теоретическую основу для разработки методов выявления психоэмоционального воздействия и формирования систем автоматизированного анализа аудиопотоков, способных учитывать как физические характеристики сигнала, так и его смысловую и когнитивную структуру.

Психоэмоциональное воздействие – это содержание, передаваемое в сообщениях (в том числе в аудиопотоках), которое приводит к искажению восприятия, интерпретации и/или выбора поведения адресата за счёт воздействия на когнитивные, эмоциональные, социальные и подсознательные механизмы обработки информации. Искажение может возникать как вследствие внесения ложных, неполных или смещённых сведений, так и вследствие организации потока подачи (отбор, дозирование, повтор, акцентирование), изменяющей картину мира у аудитории независимо от формальной «истинности» отдельных фрагментов [6].

Следует подчеркнуть, что психоэмоциональное воздействие не тождественно «негативному» в этическом или медицинском смысле. Термин «психоэмоциональное воздействие» здесь фиксирует сам факт изменения исходного состояния восприятия, установок или поведения, то есть «разрушение» прежней когнитивной или эмоциональной конфигурации.

Таким образом, ограниченность входного потока выступает самостоятельным фактором искажения: она меняет не отдельные утверждения, а структуру знания, на основе которой принимаются решения и формируются установки.

Психоэмоциональное воздействие целесообразно рассматривать как многоуровневое и проявляющееся одновременно на нескольких уровнях:

- когнитивный уровень – влияние на понимание, интерпретацию, причинно-следственные связи, оценку достоверности и формирование убеждений; сюда относятся фреймирование, подмена фактов оценками, ложные причинные схемы, селективная подача;
- эмоциональный уровень – управление аффективным состоянием (тревога, гнев, страх, эйфория, чувство угрозы/вины), которое затем задаёт «готовые» оценки и снижает критичность восприятия;
- социальный уровень – формирование групповых установок и норм (поляризация «мы – они», стереотипизация, давление конформизма, делегитимация альтернативных источников, нормализация агрессии);
- подсознательный уровень – воздействие, которое реализуется без явного осознания адресатом, через суггестивные и ассоциативные механизмы: интонацию, ритмику, повторяемые формулы, звуковые «якоря», скрытые импликации и пресуппозиции. На этом уровне формируется преднастройка интерпретации и реакций ещё до рационального осмысления содержания.

Следовательно, психоэмоциональное воздействие определяется не столько наличием «негативной» лексики или тематики, сколько способностью вызывать искажение восприятия и интерпретации – через подмену рамок, деформацию причинно-следственных связей, манипуляцию эмоциональным состоянием и/или ограничение входного потока данных. Негативное содержание может быть частным случаем, однако ключевым признаком психоэмоционального воздействия является искажение картины реальности и механизмов принятия решений, а не обязательно «плохой» или «враждебный» смысл на поверхности текста/звука.



Рисунок 1 – Различные уровни психоэмоционального воздействия

Современные исследователи [1] отмечают, что влияние психоэмоционального воздействия в аудиосфере носит комплексный характер и проявляется на четырёх взаимосвязанных уровнях: психолингвистическом, акустико-физиологическом, когнитивно-семиотическом и социокультурно-медийном. Рассмотрение каждого из них позволяет понять, как звук превращается в инструмент формирования эмоций, мыслей и поведенческих реакций.

Психоэмоциональное воздействие в аудиосредах описывает такие формы звукового и речевого воздействия, которые подрывают когнитивную устойчивость и эмоциональное равновесие человека, искажают интерпретацию событий и снижают способность к критической оценке сообщений. В современных медиаэкосистемах – от прямых эфиров и подкастов до коротких клипов и автоматизированных голосовых ассистентов – психоэмоциональное воздействие редко сводится к одному измерению: реальное воздействие возникает на стыке психолингвистического, акустико-физиологического, когнитивно-семиотического и социокультурно-медийного уровней. В результате формируется многоуровневый «градиент влияния», где ритмико-интонационные паттерны подготавливают эмоциональную восприимчивость, парадоксальные или противоречивые тезисы рушат привычные когнитивные схемы, а массово транслируемые аудиомаркеры закрепляют новые нормы восприятия.

ТИПОЛОГИЯ АУДИОПОТОКОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ФОРМЫ АУДИОВОЗДЕЙСТВИЯ

Аудиопоток как форма цифровой коммуникации характеризуется многообразием режимов передачи и потребления, которые определяют не только технические параметры распространения звукового сигнала, но и особенности его восприятия и воздействия на слушателя. В отличие от статических форм представления информации, аудиопоток представляет собой непрерывный процесс, разворачивающийся во времени и формирующий последовательную структуру воздействия. Это означает, что интерпретация сообщения зависит не только от его содержания, но и от порядка, длительности, ритма и акустических характеристик звучания [5].

Одним из ключевых факторов, определяющих характер аудиовоздействия, является тип аудиопотока. Различные типы аудиопотоков отличаются степенью контроля со стороны слушателя, уровнем интерактивности и способом формирования содержания. Эти параметры непосредственно влияют на когнитивную нагрузку, эмоциональную вовлечённость и возможность критического анализа информации. В частности, аудиопотоки, передаваемые в режиме реального времени, ограничивают возможность повторного анализа и способствуют более непосредственному восприятию информации, тогда как аудиопотоки, доступные по запросу, допускают многократное прослушивание и более глубокую когнитивную обработку.

Систематизация типов аудиопотоков позволяет выявить структурные особенности аудиосреды и определить условия, при которых аудиоконтент может оказывать наиболее выраженное воздействие на слушателя [6].

Таблица 1 – Типология аудиопотоков [7–9]

Тип аудиопотока	Сущность	Примеры
Линейный (трансляционный)	Передача звука в режиме реального времени без возможности вмешательства слушателя. Характеризуется непрерывностью и односторонним характером коммуникации	Радиозфиры, новостные трансляции, прямые стримы
Нелинейный (по запросу)	Пользователь самостоятельно определяет время и порядок прослушивания. Допускает повторное воспроизведение и аналитическое восприятие	Подкасты, аудиокниги, архивные записи
Интерактивный	Обеспечивает возможность обратной связи между источником и аудиторией. Позволяет динамически изменять содержание в зависимости от реакции слушателей	Онлайн-трансляции, видеоконференции, голосовые чаты
Алгоритмический	Формируется автоматически с использованием алгоритмов или систем искусственного интеллекта. Адаптируется к предпочтениям пользователя	Голосовые помощники, персонализированные аудиорекомендации

Представленная типология отражает различия в степени управляемости аудиопотока и уровне когнитивного контроля со стороны слушателя. Линейные аудиопотоки характеризуются минимальной возможностью вмешательства и требуют непрерывного восприятия, что снижает возможность критического анализа информации. Нелинейные аудиопотоки, напротив, обеспечивают более высокий уровень когнитивного контроля, поскольку допускают повторное прослушивание и анализ содержания. Интерактивные аудиопотоки формируют двустороннюю коммуникационную среду, в которой содержание может изменяться в процессе взаимодействия. Алгоритмические аудиопотоки отличаются тем, что их структура и содержание формируются автоматически на основе анализа поведения пользователя, что создаёт возможность адаптации аудиоконтента к индивидуальным особенностям восприятия.

Помимо структурных характеристик, аудиопотоки различаются по функциональному назначению, которое определяет их коммуникативную роль и характер воздействия. Информационно-коммуникативная функция аудиопотока связана с передачей фактических сведений и формированием когнитивных представлений. В этом случае аудиопоток выполняет роль носителя информации и обеспечивает обмен знаниями между источником и слушателем.

Эмоционально-экспрессивная функция связана с передачей эмоциональных состояний и формированием аффективного восприятия. Интонация, тембр, ритм и динамика звука способны усиливать эмоциональное воздействие и формировать определённое психологическое состояние слушателя. Это позволяет аудиопотоку выступать в качестве средства эмоционального воздействия, даже при отсутствии выраженного смыслового содержания.

Регулятивная функция аудиопотока проявляется в его способности формировать поведенческие реакции и направлять действия слушателя. Это достигается через использование речевых конструкций, интонационных паттернов и повторяющихся звуковых структур, способных усиливать воспринимаемую значимость сообщения.

Таким образом, аудиопоток следует рассматривать как сложную коммуникативную систему, сочетающую передачу информации, эмоциональное воздействие и регуляцию поведения. Его типологические и функциональные характеристики определяют условия восприятия и степень воздействия на слушателя. Понимание этих характеристик является необходимым условием для разработки методов анализа аудиопотоков и выявления психоэмоционального воздействия [10].

НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ АУДИОПОТОКОВ И ВЫЯВЛЕНИЮ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Теоретическая рамка анализа аудиопотоков опирается на несколько взаимодополняющих традиций, каждая из которых фиксирует «свою» грань аудиовоздействия и тем самым задаёт разные основания для детектирования психоэмоционального воздействия.

Таблица 2 – Научные подходы к анализу аудиопотоков и их прикладная значимость [11, 12, 17–20]

Подход	Содержание	Представители	Значимость
Психолингвистический	Изучает взаимосвязь между звуком и психикой; механизмы понимания и внушения через речь	Тарасов Е. Ф., Баранов А. Н.	Позволяет определить границу между информацией и манипуляцией
Когнитивно-семиотический	Рассматривает аудиопоток как знаковую систему, влияющую на мышление и модели мира	Лотман Ю. М., ван Дейк Т.	Выявляет структуры скрытого смысла и коды влияния
Информационно-коммуникационный	Моделирует передачу сообщения как процесс в канале связи; шумы, энтропия, устойчивость	Шеннон К., Винер Н.	Даёт измеримые метрики воздействия и искажений
Психоакустический	Анализирует влияние частот, амплитуды и ритма на нервную систему	Шахов С. М., Климов В. В.	Позволяет разрабатывать методы детектирования психоэмоционального воздействия

Психолингвистический подход делает центральным объектом не сам сигнал, а процесс его понимания: звук рассматривается как носитель смысла и одновременно как инструмент внушения, поскольку просодия и тембр могут усиливать директивность, формировать доверие или тревожность и сдвигать интерпретацию при неизменном вербальном содержании. Когнитивно-семиотический подход переносит внимание на кодовую природу аудио: интонационные схемы, ритмические повторы, характер пауз и «звуковые маркеры» трактуются как знаки, закреплённые культурными и медиальными практиками; поэтому потенциальное психоэмоциональное воздействие выявляется не только в «что сказано», но и в «как организовано звучание» и какие устойчивые коды воздействия активируются у слушателя. Информационно-коммуникационная линия, напротив, предлагает формализацию аудиопотока как сообщения, передаваемого по каналу с шумами: здесь значимы измеримые показатели структуры и устойчивости сигнала, позволяющие выявлять аномальные режимы подачи, резкие контрасты, навязчивую повторяемость, высокую «информационную плотность» и иные признаки, которые могут выступать технологическими маркерами давления или манипуляции. Психоакустический подход связывает физику звука с психофизиологией восприятия и тем самым объясняет, почему определённые частотные и динамические конфигурации способны повышать напряжение и утомляемость, снижать критичность восприятия и усиливать внушаемость. В совокупности эти подходы задают методологическую основу комплексного анализа: психоэмоциональный эффект рассматривается как результат сопряжения смыслового слоя, просодико-акустической организации и кодовой (знаковой) структуры аудиопотока, а практическая задача детектирования требует одновременного учёта всех трёх измерений.

Рассмотрение аудиопотока как самостоятельной формы цифровой коммуникации показывает, что он обладает специфическими свойствами, которые принципиально усложняют задачу выявления психоэмоционального воздействия. В отличие от текстовых сообщений, аудиопоток воспринимается линейно, в режиме временного развёртывания, что снижает возможности мгновенной проверки и критической переработки содержания и повышает роль невербальных компонентов. В результате значимым источником воздействия становятся не только лексико-семантические конструкции, но и акустическая форма подачи: интонация, темп, ритм, паузирование и тембровая организация, которые способны формировать эмоциональные реакции и сдвигать интерпретацию высказываний даже при нейтральном вербальном содержании [15].

Систематизация типов аудиопотоков демонстрирует, что условия восприятия и степень контроля со стороны слушателя оказывают прямое влияние на вероятность психоэмоционального воздействия. Линейные трансляционные форматы характеризуются минимальной возможностью остановки и повторного анализа, что увеличивает уязвимость к суггестивным приёмам. Нелинейные форматы «по запросу» допускают повторение и аналитическое прослушивание, однако сохраняют риск воздействия за счёт повторяемости и длительности экспозиции. Интерактивные форматы дополнительно включают социальный фактор, связанный с влиянием аудитории и эффектом группового подкрепления. Алгоритмические форматы усиливают индивидуализацию воздействия, поскольку содержание и динамика подачи могут адаптироваться под предпочтения пользователя, потенциально фиксируя и усиливая когнитивные и эмоциональные установки. Для решения данной проблемы необходимо использовать методы искусственного интеллекта.

Интеграция признаков в подобных системах может осуществляться как на ранних этапах обработки данных, так и после формирования специализированных представлений в отдельных подсистемах. В рассматриваемой задаче раннее объединение признаков представляется менее предпочтительным, поскольку различные типы данных характеризуются несогласованностью временных

шкал и неоднородностью внутренней структуры. В частности, спектрограммы, просодические последовательности и текстовые токены обладают различной природой представления, что усложняет их прямое совмещение на начальном этапе обработки и создаёт риск подавления информативности отдельных каналов.

Поздняя интеграция предполагает предварительное формирование в каждой ветви собственного векторного представления фиксированной размерности с последующим объединением этих эмбедингов на более высоком уровне абстракции. Такой подход обеспечивает модульность архитектуры, допускает независимую валидацию отдельных подсистем и в целом повышает устойчивость модели к частичной деградации одного из каналов.

Простое объединение эмбедингов само по себе не обеспечивает согласования различных каналов представления, а лишь переносит эту задачу на финальный классификатор. На практике это создаёт дополнительные ограничения, особенно при работе с неоднородными входными данными. Шумовые искажения, ошибки автоматического распознавания речи, различия в просодической организации сигнала могут приводить к тому, что один из каналов начинает доминировать, тогда как информативность остальных используется неполно. В результате снижается способность модели к обобщению на новых данных.

Использование механизма внимания позволяет решать эту задачу более гибко. В таком случае вклад каждой ветви определяется не заранее и не одинаково для всех примеров, а с учётом характеристик конкретного аудиофрагмента. Весовые коэффициенты, нормируемые с помощью softmax-функции, задают относительную значимость акустического, лингвистического и просодико-семиотического представлений в итоговом решении. Это даёт возможность согласовывать разнородные признаки не формально, а с опорой на их фактическую информативность.

С практической точки зрения такой подход важен не только для повышения устойчивости модели, но и для последующей интерпретации её работы. Распределение весов между ветвями позволяет видеть, какой именно канал в наибольшей степени повлиял на классификацию конкретного фрагмента. Это создаёт основу для анализа ошибок, сопоставления различных режимов работы модели и экспертной оценки обоснованности полученного результата.

Для оптимизации параметров модели применяется алгоритм Adam, сочетающий адаптивную настройку шага обучения с учётом первых и вторых моментов градиента. Использование данного алгоритма представляется обоснованным в силу его устойчивости при работе с многокомпонентными архитектурами и способности обеспечивать эффективную настройку параметров в условиях сложного ландшафта функции потерь.

В многоходовой архитектуре масштабы градиентов различных ветвей могут существенно различаться; адаптивный характер Adam способствует устойчивости обучения и ускоряет сходимость без необходимости сложного подбора расписания скорости обучения.

Таблица 3 – Архитектура единой нейросетевой модели

Компонент	Выбор	Формула/пояснение
Целевая функция	Бинарная кросс-энтропия	$L = -(y \ln p + (1 - y) \ln(1 - p))$
Взвешивание классов	При дисбалансе	$L = -(\lambda_1 y \ln p + \lambda_0 (1 - y) \ln(1 - p))$
Оптимизатор	Adam	Обновление по градиенту $\nabla \theta L$
Скорость обучения	$1e-4 \dots 3e-4$	Подбирается по валидации
Регуляризация	dropout + weight decay	Снижает переобучение
Метрики	F1, Precision, Recall, ROC-AUC	Для контроля качества

Таблица 4 – Характеристика слоёв разрабатываемой нейросети

Блок	Вход	Слой и количество	Размерности на выходе	Активации /примечания
0. Вход	$(x[n]), (n=1..N)$	–	$N = T \cdot f_s$	Нормированный аудиосигнал
Предобработка	$(x[n])$	VAD + шумоподавление + нормализация + framing	Окна (t_0 K)	Формирует окна для S и P; ASR для текста
2A Ветвь A	$(x[n])$	STFT $\rightarrow$ mel filterbank	$S \in RF \times K$	Обычно ($F=64..128$)
2B. Ветвь B	$(x[n])$	ASR $\rightarrow$ токены	$((t \ 1..t \ L))$	L зависит от речи
2C. Ветвь C	$(x[n])$	F0 + energy + pauses + tempo	$P \in RdP \times K$	Обычно $d_p = 10..30$

В рамках данной архитектуры эти уровни не подменяют друг друга: каждый обеспечивает отдельную «линейку наблюдений», а итоговая оценка возникает как результат их интеграции в едином пространстве признаков. Важнейшая методологическая установка заключается в том, что наличие психоэмоционального воздействия не сводится ни к набору запрещённых слов, ни к аномальной акустике, ни к субъективной интерпретации интонации; модель должна уметь фиксировать данное воздействие как системное явление, где форма, смысл и механизм воздействия находятся в связке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показывает, что аудиопоток представляет собой сложный объект цифровой коммуникации, в котором потенциально психоэмоциональное воздействие формируется сразу на нескольких уровнях. Значение имеет не только словесное содержание сообщения, но и способ его звуковой организации, темп развёртывания, особенности интонации, повторяемость отдельных элементов и условия восприятия. По этой причине выявление психоэмоционального воздействия нельзя сводить ни к поиску отдельных речевых маркеров, ни к фиксации изолированных акустических аномалий.

Рассмотрение различных типов аудиопотоков позволяет сделать вывод о том, что вероятность и характер воздействия зависят от режима функционирования среды. Линейные и интерактивные форматы усиливают эффект вовлечения за счёт непрерывности восприятия и снижения дистанции между источником и адресатом. Алгоритмически формируемые потоки дополнительно повышают риск закрепления эмоциональных и когнитивных установок, поскольку подача контента подстраивается под предполагаемые особенности пользователя. Следовательно, анализ должен учитывать не только внутренние свойства аудиосигнала, но и коммуникативную форму его распространения.

Сопоставление психолингвистического, когнитивно-семиотического, информационно-коммуникационного и психоакустического подходов показывает, что каждый из них раскрывает лишь отдельную сторону общего механизма воздействия. В совокупности они дают основание рассматривать психоэмоциональное воздействие как результат сочетания смысловых, акустических и просодических признаков. Такой вывод делает оправданным использование многовходовой модели, в которой разные каналы анализа не подменяют друг друга, а работают совместно.

Отдельного внимания заслуживает идея поздней интеграции признаков и применения механизма внимания. В таком случае итоговое решение формируется не на основании одного доминирующего источника данных, а по результатам согласования нескольких представлений аудиофрагмента. Это позволяет уменьшить влияние шумов, ошибок распознавания и неполноты отдельных данных, а также делает интерпретацию результата более содержательной. В результате формируется основа для построения объяснимых систем автоматизированного выявления психоэмоционального воздействия в аудиопотоках.

Научный результат состоит в обосновании концептуальной модели детектирования психоэмоционального воздействия, основанной на многовходовой архитектуре с отдельной обработкой акустического, лингвистического и просодико-семиотического каналов и их последующим объединением на более высоком уровне анализа. Такая логика позволяет учитывать неоднородность аудиоданных и не сводить оценку к одному классу признаков. Применение механизма внимания делает модель более гибкой, поскольку в каждом конкретном случае можно учитывать реальную значимость того канала, который несёт наибольшую диагностическую нагрузку.

Список источников

1. Баранов, А. Н. Лингвистические механизмы манипулирования сознанием / А. Н. Баранов. – Москва : Наука, 2020.
2. Тарасов, Е. Ф. Психолингвистика аудиовосприятия речи / Е. Ф. Тарасов. – Москва : ИФ РАН, 2016.
3. Леонтьев, А. А. Психолингвистика / А. А. Леонтьев. – Москва : Смысл, 1997.
4. Зимняя, И. А. Психология речи / И. А. Зимняя. – Москва : МГУ, 2001.

5. Карасик, В. И. Языковой круг: личность, концепты, дискурс / В. И. Карасик. – Волгоград : Перемена, 2002.
6. Климов, В. В. Медиафрейминг и аудиовоздействие в цифровой среде / В. В. Климов. – Москва : МГУ, 2019.
7. Лотман, Ю. М. Семиосфера / Ю. М. Лотман. – Санкт-Петербург : Искусство, 2000.
8. Лотман, Ю. М. Семиотика культуры и искусства / Ю. М. Лотман. – Москва : Наука, 1999.
9. Шахов, С. М. Акустические методы анализа речевых потоков / С. М. Шахов. – Санкт-Петербург : Политехника, 2018.
10. Потапова, Р. К. Речь: коммуникация, информация, кибернетика / Р. К. Потапова, В. В. Потапов. – Москва : ЛКИ, 2015.
11. Тарасов, Е. Ф. Когнитивные основы речевого общения / Е. Ф. Тарасов. – Москва, 2005.
12. Лурия, А. Р. Язык и сознание / А. Р. Лурия. – Москва : Изд-во МГУ, 1979.
13. Левицкий, Ю. А. Фонетика и интонация речи / Ю. А. Левицкий. – Санкт-Петербург : Филологический факультет СПбГУ, 2012.
14. Романов, А. А. Психолингвистические механизмы речевого воздействия / А. А. Романов. – Санкт-Петербург : Питер, 2020.
15. Горбанев, С. А. Речевая манипуляция и суггестивные технологии / С. А. Горбанев. – Москва : Логос, 2019.
16. Ермакова, О. П. Семантика эмоциональной оценки в устной речи / О. П. Ермакова. – Москва : Институт языкознания РАН, 2018.
17. Крылов, А. Н. Языковая агрессия и формы её проявления / А. Н. Крылов. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ, 2017.
18. Лазарева, М. А. Нарративные стратегии в современной медиаречи / М. А. Лазарева. – Москва : МГУ, 2020.
19. Борисова, Е. В. Когнитивная метафора в российском медийном дискурсе / Е. В. Борисова. – Москва : УРСС, 2022.
20. Россинская, Е. Р. Фоноскопическая и психолингвистическая экспертиза речевых сигналов / Е. Р. Россинская. – Москва : Юрлитинформ, 2019.

References

1. Baranov, A. N. *Linguistic Mechanisms of Consciousness Manipulation*. Moscow, Nauka Publ., 2020 (In Russ.).
2. Tarasov, E. F. *Psycholinguistics of Auditory Speech Perception*. Moscow, IF RAS, 2016 (In Russ.).
3. Leontyev, A. A. *Psycholinguistics*. Moscow, Smysl Publ., 1997 (In Russ.).
4. Zimnyaya, I. A. *Psychology of Speech*. Moscow, MSU, 2001 (In Russ.).
5. Karasik, V. I. *The Linguistic Circle: Personality, Concepts, Discourse*. Volgograd, Peremena Publ., 2002 (In Russ.).
6. Klimov, V. V. *Media Framing and Audio Impact in the Digital Environment*. Moscow, MSU, 2019 (In Russ.).
7. Lotman, Yu. M. *Semiosphere*. Saint Petersburg : Iskusstvo Publ., 2000 (In Russ.).
8. Lotman, Yu. M. *Semiotics of Culture and Art*. Moscow, Nauka Publ., 1999 (In Russ.).
9. Shakhov, S. M. *Acoustic Methods for Analyzing Speech Flows*. Saint Petersburg, Politekhnik Publ., 2018 (In Russ.).
10. Potapova, R. K., Potapov, V. V. *Speech: Communication, Information, Cybernetics*. Moscow, LKI, 2015 (In Russ.).
11. Tarasov, E. F. *Cognitive Foundations of Verbal Communication*. Moscow, 2005 (In Russ.).
12. Luria, A. R. *Language and Consciousness*. Moscow, Moscow State University Press, 1979 (In Russ.).
13. Levitsky, Yu. A. *Phonetics and Speech Intonation*. Saint Petersburg, Faculty of Philology, St. Petersburg State University, 2012 (In Russ.).
14. Romanov, A. A. *Psycholinguistic Mechanisms of Verbal Influence*. Saint Petersburg, Piter Publ., 2020 (In Russ.).
15. Gorbanev, S. A. *Verbal Manipulation and Suggestive Techniques*. Moscow, Logos Publ., 2019 (In Russ.).
16. Ermakova, O. P. *Semantics of Emotional Evaluation in Oral Speech*. Moscow, Institute of Linguistics of the Russian Academy of Sciences, 2018 (In Russ.).
17. Krylov, A. N. *Linguistic Aggression and Forms of Its Manifestation*. St. Petersburg, St. Petersburg State University Press, 2017 (In Russ.).
18. Lazareva, M. A. *Narrative Strategies in Contemporary Media Speech*. Moscow, Moscow State University, 2020 (In Russ.).
19. Borisova, E. V. *Cognitive Metaphor in Russian Media Discourse*. Moscow, URSS, 2022 (In Russ.).
20. Rossinskaya, E. R. *Phonoscopic and Psycholinguistic Analysis of Speech Signals*. Moscow, Yurlitinform Publ., 2019 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 30.03.2026; одобрена после рецензирования 15.04.2026; принята к публикации 19.04.2026.

The article was submitted 30.03.2026; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 19.04.2026.

УДК 004.42

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НЕВЕРБАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ
ЧЕЛОВЕКА В АФФЕКТИВНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ**

Настасюк Андрей Юрьевич, Московский финансово-юридический университет МФЮА, 117342, Российская Федерация, г. Москва, ул. Введенского, 1А,

аспирант, ORCID: 0009-0008-8363-7870, e-mail: ananastasyuk@mail.ru

Селиванов Максим Евгеньевич, Институт системного программирования имени В. П. Иванникова Российской академии наук, 109004, Российская Федерация, г. Москва, ул. А. Солженицына 25, аспирант, ORCID: 0009-0000-7450-8956, e-mail: xmaz1337@gmail.com

Захарченко Нина Андреевна, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, магистрант, ORCID: 0009-0007-5490-5891, e-mail: niazakharchenko@ncfu.ru

Кучеров Николай Николаевич, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0003-0337-0093, e-mail: nkuchеров@ncfu.ru

Лапина Мария Анатольевна, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,

кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-8117-9142, e-mail: mlapina@ncfu.ru

В работе рассмотрены современные методы интерпретации невербального поведения человека в контексте аффективных вычислений. Проведён обзор и сравнительный анализ подходов к моделированию аффективных состояний на основе визуальных, акустических и физиологических невербальных сигналов. Рассмотрены основные онтологии аффекта, используемые в аффективных вычислениях, включая категориальные и размерные представления эмоций, а также их влияние на постановку задачи, архитектуру моделей и интерпретацию результатов. Проанализированы уровни представления невербальных данных – от низкоуровневых физических сигналов до интерпретационных моделей, в которых аффективное состояние рассматривается как латентная динамическая переменная. Рассмотрены одномодальные и мультимодальные методы анализа невербального поведения, включая стратегии раннего и позднего слияния, а также современные attention- и transformer-архитектуры. Отдельное внимание уделено проблеме неопределённости и экологической валидности систем интерпретации невербального поведения в реальных условиях взаимодействия человек – компьютер. Сделаны выводы о преимуществах динамических мультимодальных моделей с явным учётом неопределённости по сравнению с системами формального распознавания эмоций.

Ключевые слова: аффективные вычисления, невербальное поведение, мультимодальные данные, интерпретация эмоций, трансформерные модели, неопределённость

Финансирование: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-71-30007, <https://rscf.ru/project/25-71-30007/>.

**MODERN METHODS FOR INTERPRETING HUMAN NONVERBAL BEHAVIOR
IN AFFECTIVE COMPUTING**

Nastasyuk Andrey Yu., Moscow University of Finance and Law (MFUA), 1A Vvedenskogo St., Moscow, 117342, Russian Federation,

graduate student, ORCID: 0009-0008-8363-7870, e-mail: ananastasyuk@mail.ru

Selivanov Maxim E., Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 25 A Solzhenitsyn St., Moscow, 109004, Russian Federation, graduate student, ORCID: 0009-0000-7450-8956, e-mail: xmaz1337@gmail.com

Zakharchenko Nina A., North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation, master's student, ORCID: 0009-0007-5490-5891, e-mail: niazakharchenko@ncfu.ru

Kuchеров Nikolay N., North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0003-0337-0093, e-mail: nkuchеров@ncfu.ru

Lapina Maria A., North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-8117-9142, e-mail: mlapina@ncfu.ru

This paper examines modern methods for interpreting human nonverbal behavior in the context of affective computing. A review and comparative analysis of approaches to modeling affective states based on visual, acoustic, and physiological nonverbal signals is presented. The main affect ontologies used in affective computing are considered, including categorical and dimensional representations of emotions, as well as their influence on problem formulation, model architectures, and result interpretation. Levels of nonverbal data representation are analyzed, ranging from low-level physical signals to interpretative models in which the affective state is treated as a latent dynamic variable. Unimodal and multimodal methods for nonverbal behavior analysis are discussed, including early and late fusion strategies, as well as modern attention- and transformer-based architectures. Particular attention is paid to the problem of uncertainty and the ecological validity of nonverbal behavior interpretation systems in real-world human–computer interaction scenarios. Conclusions are drawn regarding the advantages of dynamic multimodal models with explicit uncertainty modeling compared to systems based on formal emotion recognition.

Keywords: affective computing, nonverbal behavior, multimodal data, emotion interpretation, transformer models, uncertainty

Financial support: the research was supported by the Russian Science Foundation grant № 25-71-30007, <https://rscf.ru/project/25-71-30007/>.

ВВЕДЕНИЕ

Невербальное поведение человека – мимика, жесты, поза, просодические характеристики речи и физиологические реакции – является основным каналом передачи аффективной информации, что обусловило развитие аффективных вычислений как междисциплинарной области, направленной на построение вычислительных моделей анализа внутренних состояний человека на основе наблюдаемых невербальных сигналов [1, 2].

Методы, основанные на глубоких нейронных сетях и трансформерных архитектурах, демонстрируют высокие показатели качества в контролируемых условиях, однако их переносимость и интерпретируемость существенно снижаются при изменении условий наблюдения, состава модальностей и контекста [3–7]. Это объясняется латентной и контекстно-зависимой природой аффективного состояния, которое не наблюдается напрямую и проявляется через неоднозначные и асинхронные невербальные сигналы [8, 9], что обосновывает переход от формального распознавания эмоций к моделям интерпретации, учитывающим временную динамику, мультимодальность и неопределенность наблюдений [6, 7, 10].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ АФФЕКТИВНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Выбор онтологии эмоций является ключевым методологическим решением в системах аффективных вычислений, поскольку принятая онтология задаёт формулировку задачи обучения, требования к аннотации, используемые метрики качества и способы учёта неопределённости вывода [1, 8].

Категориальные модели эмоций исходят из конечного набора дискретных состояний, что удобно для постановки задачи как многоклассовой классификации [11]. Их выразительность ограничена при описании смешанных, слабо выраженных и контекстно-зависимых состояний, а также при культурной и индивидуальной вариативности эмоциональных проявлений [8, 9, 11]. Размерные модели описывают аффект как непрерывное пространство – чаще всего валентность-возбуждение, – что лучше согласуется с анализом динамики и спонтанного поведения и естественно приводит к регрессионной постановке [12]. Их ограничение связано с семантической неоднозначностью: идентичные значения размерных параметров могут соответствовать различным феноменологическим состояниям, поэтому интерпретация требует контекста и/или дополнительных модальностей [6, 8].

Онтология аффекта определяет не только пространство целевых меток, но и структуру вероятностной модели, связывающей невербальные сигналы, контекст и латентное состояние субъекта [9, 10]. Выбор между категориальным и размерным представлением задаёт компромисс между интерпретируемостью, выразительной способностью модели и экологической валидностью системы [8, 9], что необходимо учитывать при проектировании архитектур мультимодального моделирования.

Систематизация онтологических и методологических решений представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Основные подходы к интерпретации невербального поведения

Уровень анализа	Класс подходов	Краткая характеристика	Ключевые ограничения	Источники
Онтология аффекта	Категориальная	Дискретное представление эмоций; задача формулируется как классификация. Высокая интерпретируемость	Неспособность описывать смешанные и контекстно-зависимые состояния; культурная вариативность	[8], [11]
	Размерная	Непрерывное представление аффекта (валентность, возбуждение); удобно для анализа динамики	Семантическая неоднозначность без контекста; сложность интерпретации	[8], [12], [13]
Уровень представления данных	Низкоуровневый (сигнальный)	Анализ физических сигналов или «сырых» данных; end-to-end обучение	Семантический разрыв между сигналом и аффектом; чувствительность к шуму	[4], [26]
	Функциональный	Использование промежуточных поведенческих единиц (мимика, поза, просодия)	Ошибки на нижнем уровне каскадно влияют на интерпретацию	[24], [13]
Вычислительная парадигма	Декомпозиционная	Последовательный конвейер обработки	Накопление ошибок; ограниченная адаптивность	[5], [13]
	Интегральная (end-to-end)	Прямое отображение входных сигналов в аффективные представления	Низкая интерпретируемость; высокие требования к данным	[3], [4]
Мультимодальное моделирование	Раннее слияние	Интеграция признаков разных модальностей на раннем этапе	Требует синхронности; рост размерности	[5], [7]
	Позднее слияние	Независимая обработка модальностей с последующей агрегацией решений	Потеря кросс-модальных зависимостей	[5], [6]
	Attention-based / Transformer	Кросс-модальное внимание, адаптивное взвешивание сигналов	Архитектурная сложность; снижение прозрачности	[3], [17], [18]
Экологическая валидность	Статические модели	Интерпретация отдельных наблюдений без учёта динамики	Игнорирование контекста и инерционности аффекта	[8], [10]
	Динамические и uncertainty-aware	Аффект как латентное состояние; явный учёт неопределённости	Рост сложности моделей; сложность объяснения	[21], [22]

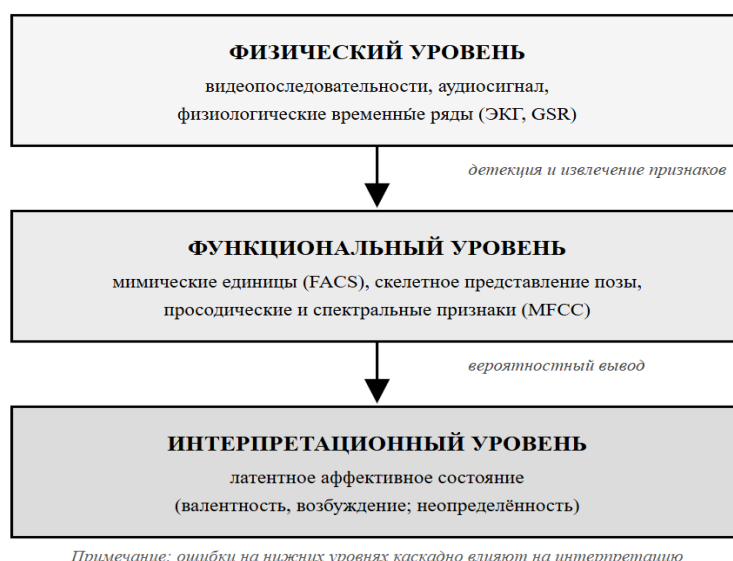
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НЕВЕРБАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ В АФФЕКТИВНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ

В аффективных вычислениях анализ невербального поведения традиционно формулировался как задача распознавания эмоций, при которой наблюдаемые признаки отображаются в заранее определённые аффективные метки или непрерывные параметры – классификация базовых эмоций по видеопоследовательностям лица и анализ просодических характеристик речи служат типичными примерами [4, 13]. Подобная постановка предполагает устойчивое соответствие между невербальными признаками и аффективными состояниями, однако качество мультимодальных систем ограничивается неоднозначностью целевых меток и вариативностью процедур аннотации [5], асинхронностью сигналов и трудностями согласования модальностей [6], а также контекстной зависимостью эмоциональных категорий, при которой фиксированные аффективные метки не отражают внутреннее состояние субъекта без учёта ситуации [8].

В отличие от систем прямого распознавания, вероятностные модели, в частности скрытые марковские модели переходов аффективных состояний [16] и мультимодальные трансформеры [17], трактуют эмоцию как латентную переменную, которая эволюционирует во времени и обновляется по мере поступления наблюдаемых невербальных сигналов [10]. Ключевое методологическое различие состоит в том, как каждый из подходов обращается с неопределённостью: оптимизация

по фиксированным аффективным меткам вынуждает модель давать уверенный ответ даже при противоречивых или неполных данных [6], тогда как вероятностный вывод включает неопределённость в структуру модели явно [10, 21, 22], что определяет логику организации вычислительного представления невербального поведения.

Вычислительное представление невербального поведения организуется на трёх уровнях абстракции (рис. 1). Физический уровень – изображения, аудиосигналы, физиологические временные ряды – обеспечивает воспроизводимость обработки в end-to-end моделях [4, 25, 26], однако не содержит явной семантической интерпретации аффекта. Функциональный уровень преобразует физические сигналы в устойчивые поведенческие единицы: мимические действия по FACS [24], скелетные представления позы [14], просодические и спектральные характеристики речи, включая MFCC [13]; ошибки детекции на этом уровне каскадно искажают последующую интерпретацию [14]. Интерпретационный уровень формализует внутреннее аффективное состояние как латентную переменную, динамически связанную с наблюдаемыми сигналами [10, 17], что позволяет согласовывать информацию модальностей, учитывать временную динамику и формировать выводы с явной оценкой неопределённости.



Примечание: ошибки на нижних уровнях каскадно влияют на интерпретацию

Рисунок 1 – Уровни представления невербальных сигналов

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА НЕВЕРБАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Методы обработки невербальных данных в аффективных вычислениях определяются используемой модальностью и уровнем представления сигналов. Визуальные, акустические и физиологические каналы отражают различные аспекты аффективного состояния и требуют специализированных алгоритмов, учитывающих физическую природу сигналов и характер их связи с внутренними состояниями человека [5, 7].

Визуальные методы ориентированы на анализ мимики лица, позы и жестов тела. Геометрические и текстурные признаки деформаций лицевых мышц, применявшиеся совместно с классификаторами SVM и HMM, в современных подходах вытеснены глубокими нейронными сетями, автоматически извлекающими пространственно-временные признаки из видеопоследовательностей [4]. Свёрточные и пространственно-временные архитектуры позволяют моделировать динамику выражений лица, однако остаются чувствительными к условиям съёмки, освещению и точности предварительной детекции. Анализ позы и жестов строится на преобразовании видеоданных в скелетные представления [14, 15] с последующим анализом пространственно-временных паттернов рекуррентными или графовыми нейронными сетями. Устойчивость метода существенно зависит от качества детекции ключевых точек и контекстной интерпретации жестов.

Акустические методы ориентированы на анализ просодических и спектральных характеристик речи. Признаки высоты основного тона, энергии сигнала, длительности пауз и коэффициентов MFCC подаются на вход статистических или нейросетевых моделей [13]. Для учёта временной структуры речи применяются рекуррентные архитектуры [23], а в более поздних работах трансформерные end-to-end модели, обучающиеся непосредственно на аудиосигналах [26]. Основное ограничение акустических методов состоит в низкой специфичности, а именно изменении просодических характеристик могут отражать когнитивные или физиологические процессы наряду с аффективными, что ограничивает интерпретацию в изоляции от других модальностей [13, 24].

Физиологические сигналы рассматриваются как относительно объективные индикаторы активности автономной нервной системы. Вариабельность сердечного ритма (HRV) анализируется по временным и частотным характеристикам межсокращательных интервалов для оценки уровня возбуждения и стресса [27]. Кожно-гальваническая реакция (GSR) применяется для оценки эмоционального возбуждения по амплитуде и латентности кожных откликов [28]. Показатели активности автономной нервной системы надёжнее соотносятся с компонентой возбуждения, чем с валентностью [27], что ограничивает их дискриминативность по знаку эмоции. Требования к сенсорному оборудованию и синхронизации сигналов дополнительно сужают область применения до специализированных условий.

Каждая из рассмотренных модальностей подвержена специфическим источникам шума и отражает лишь частичный аспект аффективного состояния. Одномодальные системы демонстрируют ограниченную устойчивость в условиях асинхронности сигналов, пропусков модальностей и шума [6, 7], что в совокупности с различной природой помех в каждом канале [5] обосновывает переход к мультимодальным архитектурам интеграции невербальных сигналов.

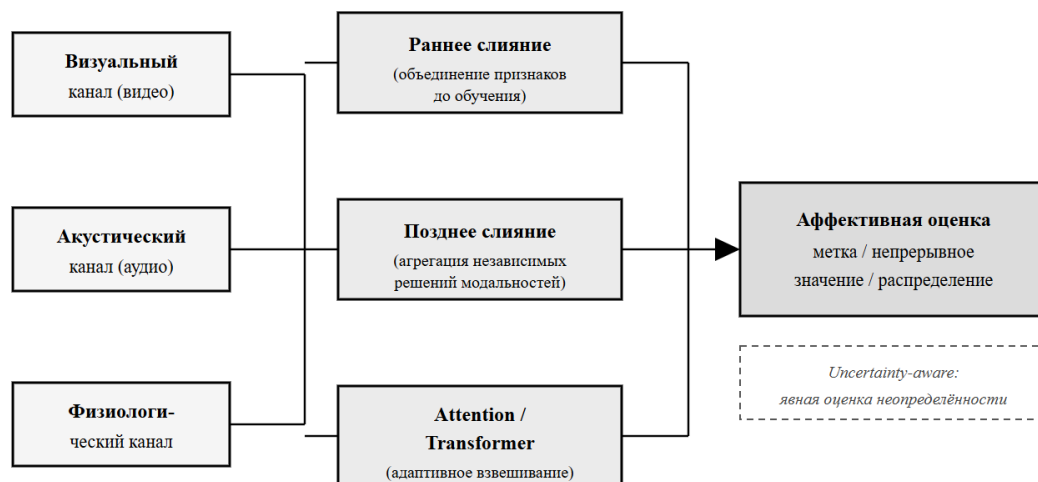
МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НЕВЕРБАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Мультимодальные модели являются ключевым компонентом современных систем интерпретации невербального поведения, поскольку интеграция визуальных, акустических и физиологических сигналов позволяет учитывать как их согласованность, так и расхождения, несущие диагностически значимую информацию [5, 7].

Классические стратегии мультимодального моделирования – раннее и позднее слияние – задают базовый компромисс между полнотой межмодального взаимодействия и устойчивостью к отсутствию отдельных каналов. Раннее слияние объединяет признаки модальностей до этапа обучения, учитывая кросс-модальные зависимости, однако требует строгой синхронизации сигналов и приводит к росту размерности признакового пространства [7, 17]. Позднее слияние обрабатывает модальности независимо и объединяет их выводы лишь на финальном шаге, что делает систему нечувствительной к выпадению каналов, но одновременно лишает её возможности улавливать то, как одна модальность уточняет или опровергает другую [5, 7].

Именно этот недостаток стал стимулом для перехода к архитектурам на основе механизмов внимания. В них модальности сначала кодируются раздельно, а кросс-модальное взаимодействие моделируется через механизм внимания, в том числе асимметричное, когда акустический сигнал, например, перевешивает визуальные признаки в зависимости от контекста [3, 18, 19]. Трансформерные модели с перекрёстным вниманием расширяют этот принцип на протяжённые временные зависимости [17, 18, 20], однако интерпретировать, почему модель пришла к конкретному выводу, в таких архитектурах становится существенно сложнее.

Принципиально иную логику реализуют доказательные модели и модели с явным учётом неопределённости, которые вместо единственного предсказания возвращают распределение над состояниями. Это позволяет явно фиксировать случаи, когда сигналы модальностей противоречат друг другу или недостаточны для уверенного вывода [21, 22]. Основные стратегии мультимодального слияния представлены на рисунке 2.



Примечание: пунктирный блок отражает дополнительный класс моделей с явным моделированием неопределённости

Рисунок 2 – Стратегии мультимодального слияния

Сравнительные характеристики основных классов мультимодальных моделей приведены в таблице 2. Выбор архитектуры мультимодального моделирования определяет баланс между выразительной способностью модели, устойчивостью к шумам и интерпретируемостью результатов в реальных сценариях взаимодействия человек – компьютер.

Таблица 2 – Классы мультимодальных моделей интерпретации аффективных состояний

Класс моделей	Основная идея	Что интерпретируется	Отношение к неопределённости	Методологические ограничения	Источники
Кадровые классификаторы	Независимая интерпретация отдельных наблюдений	Локальные признаки	Не учитывается	Игнорирование динамики и контекста	[4]
Последовательностные модели	Аффект как динамический процесс	Временные паттерны	Частично (через состояние)	Ограниченная работа с противоречиями	[10], [17]
Multimodal attention models	Адаптивное взвешивание модальностей	Кросс-модальные зависимости	Косвенно	Низкая интерпретируемость	[3], [17]
Transformer-based fusion	Совместное латентное моделирование	Долгосрочные зависимости	Косвенно	Высокая сложность	[17], [18], [20]
Uncertainty-aware models	Явное моделирование уверенности	Распределения, а не метки	Явно	Сложность интерпретации	[21], [22]

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ВАЛИДНОСТЬ

Экологическая валидность систем интерпретации невербального поведения определяется степенью согласованности вычислительной модели с реальными условиями формирования и проявления аффективных сигналов и связана не столько с используемыми датасетами, сколько с методологическими допущениями, заложенными в онтологию аффекта, структуру модели и способы обработки неопределённости [5, 7].

Статические модели, интерпретирующие каждое наблюдение в отрыве от предшествующего контекста, игнорируют то, что эмоции инерционны: их интенсивность нарастает и спадает постепенно, а не скачкообразно [10]. Динамические латентные модели учитывают эту временную структуру явно [17], что принципиально важно в естественных условиях, где сигналы нередко асинхронны, частично отсутствуют или противоречат друг другу [6]. Дополнительную сложность создаёт контекстная зависимость эмоций: одна и та же мимическая конфигурация означает разное в зависимости от ситуации, и жёсткая дискретная аннотация это различие стирает [8]. Доказательные модели и модели с явным учётом неопределённости решают эту проблему иначе – не пытаясь свести неоднозначность к единственному ответу, а сохраняя её в структуре вывода [21, 22].

Экологическая валидность предполагает не только точность предсказания, но и его интерпретируемость – возможность объяснить вывод через вклад отдельных модальностей и динамику наблюдаемых сигналов, что особенно существенно в прикладных сценариях взаимодействия человек – компьютер [5]. Механизмы внимания и анализ вклада отдельных модальностей частично повышают прозрачность сложных мультимодальных моделей [19], однако полностью непрозрачные архитектуры остаются ограниченно применимыми в реальных сценариях.

Экологическая валидность систем интерпретации невербального поведения достигается при согласованности онтологии аффекта, динамической модели поведения и механизмов учёта неопределённости – игнорирование любого из этих аспектов снижает переносимость вычислительных моделей за пределы контролируемых экспериментальных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен обзор и сравнительный анализ современных методов интерпретации невербального поведения человека в контексте аффективных вычислений по трём ключевым осям: онтологии аффекта, уровням представления невербальных сигналов и архитектурам мультимодального моделирования.

Значительная часть существующих исследований ориентирована на формальное распознавание эмоций как задачу классификации или регрессии по заранее заданным аффективным меткам. Несмотря на высокие значения стандартных метрик, такие подходы слабо отражают латентную, динамическую и контекстно-зависимую природу аффективных состояний [6, 8], что ограничивает их

переносимость вне контролируемых условий. Выбор между категориальной и размерной онтологией аффекта носит не технический, а концептуальный характер: он предопределяет, как модель обращается с неопределённостью, что считается корректным предсказанием и насколько выводы системы применимы за пределами лабораторных условий [8, 9].

Одномодальные системы закономерно уступают мультимодальным, поскольку ни один канал в отдельности не перекрывает полный спектр аффективных проявлений [5]. Архитектуры на основе механизмов внимания и трансформеров существенно продвинули решение задачи слияния модальностей, однако вместе с тем обострили проблему интерпретируемости: чем сложнее модель, тем труднее обосновать её вывод, что делает явное моделирование неопределённости приоритетным направлением дальнейших исследований [3, 17, 18, 21, 22].

Перенос таких систем в реальные сценарии взаимодействия человек – компьютер требует согласованного решения всех трёх обозначенных проблем: выбора онтологии, адекватной динамики аффекта, построения устойчивых мультимодальных архитектур и явного учёта неопределённости наблюдений, поскольку слабость любого из этих звеньев ограничивает переносимость модели в целом.

Список источников

1. Picard, R. *Affective Computing* / R. Picard. – MIT Press, 1997.
2. Poria, S. A review of affective computing: From unimodal analysis to multimodal fusion / S. Poria, E. Cambria, R. Bajpai, A. Hussain // *Information Fusion*. – 2017. – Vol. 37. – P. 98–125.
3. Hazmoune, S. Using transformers for multimodal emotion recognition: Taxonomies and state of the art review / S. Hazmoune, F. Bougamouza // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2024. – Vol. 133. – Article 108339.
4. Li, S. Deep facial expression recognition: A survey / Li S., W. Deng // *IEEE Transactions on Affective Computing*. – 2020. – Vol. 13, № 3. – P. 1195–1215.
5. D'Mello, S. A review and meta-analysis of multimodal affect detection systems / S. D'Mello, J. Kory // *ACM Computing Surveys*. – 2015. – Vol. 47, № 3.
6. Baltrušaitis, T. Multimodal machine learning: A survey and taxonomy / T. Baltrušaitis, C. Ahuja, L.-P. Morency // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2019. – Vol. 41, № 2. – P. 423–443.
7. Бердышев, Д. А. Анализ мультимодальных данных в распознавании эмоций / Д. А. Бердышев, А. Г. Шишкин // *Моделирование и анализ информационных систем*. – 2025. – № 32 (3). – С. 252–281. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2025-3-252-281>.
8. Barrett, L. F. The theory of constructed emotion: An active inference account of interoception and categorization / L. F. Barrett // *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. – 2017. – Vol. 12, № 1. – P. 1–23.
9. Scherer, K. R. What are emotions? And how can they be measured? / K. R. Scherer // *Social Science Information*. – 2005. – Vol. 44, № 4. – Pp. 695–729.
10. Wu, C. Multimodal emotion recognition in conversations: A survey of methods, trends, challenges and prospects / C. Wu, Y. Cai, Y. Liu, P. Zhu, Y. Xue, Z. Gong, J. Hirschberg, B. Ma // *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2025*. – Pp. 6257–6274. DOI: 10.18653/v1/2025.findings-emnlp.332.
11. Ekman, P. An argument for basic emotions / P. Ekman // *Cognition & Emotion*. – 1992. – Vol. 6, № 3–4. – P. 169–200.
12. Russell, J. A. A circumplex model of affect / J. A. Russell // *Journal of Personality and Social Psychology*. – 1980. – Vol. 39, № 6. – P. 1161–1178.
13. Schuller, B. *Computational Paralinguistics* / B. Schuller, A. Batliner. – Wiley, 2014.
14. Cao, Z. Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields / Z. Cao, T. Simon, S.-E. Wei, Y. Sheikh // *Proceedings of CVPR*. – 2017.
15. Lugaresi, C. MediaPipe: A framework for building perception pipelines / C. Lugaresi, J. Tang, H. Nash et al. // *arXiv preprint, arXiv:1906.08172*. – 2019.
16. Chen, X. Hidden markov modeling of emotional state transitions in interactive installation art / X. Chen, J. Li // *Sci. Rep.* – 2025. – Vol. 15. – P. 36328. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20113-7>.
17. Tsai, Y.-H. H. Multimodal transformer for unaligned multimodal language sequences / Y.-H. H. Tsai, S. Bai, P. P. Liang et al. // *Proceedings of ACL*, 2019.
18. Wang, Y. Multimodal transformer augmented fusion for speech emotion recognition / Y. Wang, Y. Gu, Y. Yin, Y. Han, H. Zhang, S. Wang, C. Li, D. Quan // *Frontiers in Neurorobotics*. – 2023. – Vol. 17. – Article 1181598. – DOI 10.3389/fnbot.2023.1181598.
19. Ryumina, E. Multi-corpus emotion recognition method based on cross-modal gated attention fusion / E. Ryumina, D. Ryumin, A. Axyonov, D. Ivanko, A. Karpov // *Pattern Recognition Letters*. – 2025. – Vol. 190. – P. 177–184. – DOI 10.1016/j.patrec.2025.02.024.
20. Zhu, X. Towards robust multimodal emotion recognition in conversation with multi-modal transformer and variational distillation fusion / X. Zhu, S. Jiang // *Journal of Intelligent Information Systems*. – 2025. – Vol. 63 (6). – P. 2057–2077. – DOI 10.1007/s10844-025-00975-z.
21. Grzechkiewicz, R. Uncertainty-aware multimodal emotion recognition through Dirichlet parameterization / R. Grzechkiewicz, E. Soriano, A. Janati et al. // *arXiv preprint, arXiv:2602.09121*. – 2026.
22. Xue, J. A Trustworthy Method for Multimodal Emotion Recognition / J. Xue, X. Liu, J. Wang, X. Wu, B. Wu // *Big Data Mining and Analytics*. – 2026. – Vol. 9 (1). – P. 229–247. DOI: 10.26599/BDMA.2025.9020050.

23. Lieskovská, E. A Review on Speech Emotion Recognition Using Deep Learning and Attention Mechanism / E. Lieskovská, M. Jakubec, R. Jarina, M. Chmulík // *Electronics*. – 2021. – Vol. 10. – P. 1163. <https://doi.org/10.3390/electronics10101163>.
24. Ekman, P. *Facial Action Coding System* / P. Ekman, W. V. Friesen Consulting Psychologists Press, 1978.
25. George, S. M. A review on speech emotion recognition: Recent advances, challenges, and the influence of noise / S. M. George, P. M. Ilyas // *Neurocomputing*. – 2024. – Vol. 568. – P. 127015. – DOI 10.1016/j.neucom.2023.127015.
26. Wagner, J. Dawn of the Transformer Era in Speech Emotion Recognition: Closing the Valence Gap / J. Wagner, A. Triantafyllopoulos, H. Wierstorf, M. Schmitt, F. Eyben, B. W. Schuller, F. Burkhardt // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2023. DOI: 10.1109/TPAMI.2023.3263585.
27. Kreibig S. D. Autonomic nervous system activity in emotion: A review / S. D. Kreibig // *Biological Psychology*. – 2010. – Vol. 84, № 3.
28. Healey, J. Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors / J. Healey, R. Picard // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2005. – Vol. 6, № 2.

References

1. Picard, R. *Affective Computing*. MIT Press, 1997.
2. Poria, S., Cambria, E., Bajpai, R., Hussain, A. A review of affective computing: From unimodal analysis to multimodal fusion. *Information Fusion*, 2017, vol. 37, pp. 98–125.
3. Hazmoune, S., Bougamouza, F. Using transformers for multimodal emotion recognition: Taxonomies and state of the art review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, vol. 133, article 108339.
4. Li, S., Deng, W. Deep facial expression recognition: A survey. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 1195–1215.
5. D'Mello, S., Kory, J. A review and meta-analysis of multimodal affect detection systems. *ACM Computing Surveys*, 2015, vol. 47, no. 3.
6. Baltrušaitis, T., Ahuja, C., Morency, L.-P. Multimodal machine learning: A survey and taxonomy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, vol. 41, no. 2, pp. 423–443.
7. Berdyshev, D. A., Shishkin, A. G. Analysis of multimodal data in emotion recognition. *Modeling and Analysis of Information Systems*, 2025, vol. 32 (3), pp. 252–281. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2025-3-252-281> (In Russ.).
8. Barrett, L. F. The theory of constructed emotion: An active inference account of interoception and categorization. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 1–23.
9. Scherer, K. R. What are emotions? And how can they be measured? *Social Science Information*, 2005, vol. 44, no. 4, pp. 695–729.
10. Wu, C., Cai, Y., Liu, Y., Zhu, P., Xue, Y., Gong, Z., Hirschberg, J., Ma, B. Multimodal emotion recognition in conversations: A survey of methods, trends, challenges and prospects. *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2025*, pp. 6257–6274. DOI: 10.18653/v1/2025.findings-emnlp.332.
11. Ekman, P. An argument for basic emotions. *Cognition & Emotion*, 1992, vol. 6, no. 3–4, pp. 169–200.
12. Russell, J. A. A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1980, vol. 39, no. 6, pp. 1161–1178.
13. Schuller, B., Batliner, A. *Computational Paralinguistics*. Wiley, 2014.
14. Cao, Z., Simon, T., Wei, S.-E., Sheikh, Y. Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields. *Proceedings of CVPR*, 2017.
15. Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H. et al. MediaPipe: A framework for building perception pipelines. *arXiv preprint, arXiv:1906.08172*, 2019.
16. Chen, X., Li, J. Hidden markov modeling of emotional state transitions in interactive installation art. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, p. 36328. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20113-7>
17. Tsai, Y.-H.H., Bai, S., Liang, P.P. et al. Multimodal transformer for unaligned multimodal language sequences. *Proceedings of ACL*, 2019.
18. Wang, Y., Gu, Y., Yin, Y., Han, Y., Zhang, H., Wang, S., Li, C., Quan, D. Multimodal transformer augmented fusion for speech emotion recognition. *Frontiers in Neurorobotics*, 2023, vol. 17, article 1181598. DOI 10.3389/fnbot.2023.1181598.
19. Ryumina, E., Ryumin, D., Axyonov, A., Ivanko, D., Karpov, A. Multi-corpus emotion recognition method based on cross-modal gated attention fusion. *Pattern Recognition Letters*, 2025, vol. 190, pp. 177–184. DOI 10.1016/j.patrec.2025.02.024.
20. Zhu, X., Jiang, S. Towards robust multimodal emotion recognition in conversation with multi-modal transformer and variational distillation fusion. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2025, vol. 63 (6), pp. 2057–2077. DOI 10.1007/s10844-025-00975-z.
21. Grzeczkwicz, R., Soriano, E., Janati, A. et al. Uncertainty-aware multimodal emotion recognition through Dirichlet parameterization. *arXiv preprint, arXiv:2602.09121*, 2026.
22. Xue, J., Liu, X., Wang, J., Wu, X., Wu, B. A Trustworthy Method for Multimodal Emotion Recognition. *Big Data Mining and Analytics*, 2026, 9(1): 229–247. DOI: 10.26599/BDMA.2025.9020050.
23. Lieskovská, E., Jakubec, M., Jarina, R., Chmulík, M. A Review on Speech Emotion Recognition Using Deep Learning and Attention Mechanism. *Electronics*, 2021, vol. 10, p. 1163. <https://doi.org/10.3390/electronics10101163>.
24. Ekman, P., Friesen, W. V. *Facial Action Coding System*. Consulting Psychologists Press, 1978.
25. George S. M., Ilyas P. M. A review on speech emotion recognition: Recent advances, challenges, and the influence of noise. *Neurocomputing*, 2024, vol. 568, p. 127015. DOI 10.1016/j.neucom.2023.127015.

26. Wagner, J., Triantafyllopoulos, A., Wierstorf, H., Schmitt, M., Eyben, F., Schuller, B. W., Burkhardt, F. Dawn of the Transformer Era in Speech Emotion Recognition: Closing the Valence Gap. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2023. DOI 10.1109/TPAMI.2023.3263585.

27. Kreibig, S. D. Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological Psychology*, 2010, vol. 84, no. 3.

28. Healey, J., Picard, R. Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2005, vol. 6, no. 2.

Статья поступила в редакцию 28.03.2026; одобрена после рецензирования 15.04.2026; принята к публикации 24.04.2026.

The article was submitted 28.03.2026; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 24.04.2026.

УДК 004.89:515.1:338.2

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.006

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕМАНТИЧЕСКОГО ЛАНДШАФТА
СТУДЕНЧЕСКИХ СТАРТАПОВ

Христофорова Анастасия Владимировна, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 428015, Российская Федерация, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский пр-т, 15,

кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-3534-8747, e-mail: khristofav@mail.ru

Митрофанова Татьяна Валерьевна, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 428015, Российская Федерация, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский пр-т, 15,

кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-5750-7991, e-mail: mitrofanova_tv@mail.ru

В статье представлены результаты исследования семантического ландшафта студенческих стартапов – системы неявных смысловых связей, формирующихся в сфере исследовательской и инновационной деятельности обучающихся. Актуальность работы обусловлена необходимостью расширения аналитического инструментария для изучения текстовых описаний стартапов методами, направленными на выявление скрытых тематических связей и междисциплинарных паттернов, что дополняет традиционные количественные, классификационные и библиометрические подходы. Эмпирическую базу исследования составили наименования 2500 проектов – победителей конкурса «Студенческий стартап» Фонда содействия инновациям. Авторы интегрировали методы обработки естественного языка (NLP) с топологическим анализом данных (TDA). Цель такого объединения – исследование семантической структуры корпуса. В результате установлено, что семантическое пространство организовано по ядерно-периферийному принципу. Устойчивые тематические ядра (например, «цифровые технологии» и «биотехнологии») окружены локальными междисциплинарными связями. Помимо этого, зафиксированы циклические структуры (гомологии H_1). Данные структуры могут выступать топологическими индикаторами междисциплинарных «мостиков». Высокая степень когерентности проектов направлений «Цифровые технологии» и «Биотехнологии» согласуется с приоритетами Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации в части задач развития экономики данных и биоэкономики. Циклические же структуры, в свою очередь, коррелируют с перечнем сквозных технологий. Для визуализации семантического ландшафта авторами предложен подход к картографированию. Его ценность заключается в выявлении зон формирующихся рынков. Такие зоны характеризуются высокой плотностью междисциплинарных связей при одновременном отсутствии устойчивых тематических ядер. Работа подтверждает перспективность топологического анализа для мониторинга инновационных сред и может быть полезна при определении точек роста и формировании мер поддержки студенческого технологического предпринимательства.

Ключевые слова: студенческое предпринимательство, стартапы, инновационные проекты, распределённые семантические представления, топологический анализ данных, персистентная гомология, анализ текстовых данных, технологическая конвергенция, междисциплинарные связи

TOPOLOGICAL ANALYSIS OF THE SEMANTIC LANDSCAPE OF STUDENT STARTUPS

Anastasiia V. Khristoforova, I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospect, Cheboksary, Chuvash Republic, 428015, Russian Federation,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, ORCID: 0000-0003-3534-8747, e-mail: khristofav@mail.ru

Tatiana V. Mitrofanova, I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospect, Cheboksary, Chuvash Republic, 428015, Russian Federation,

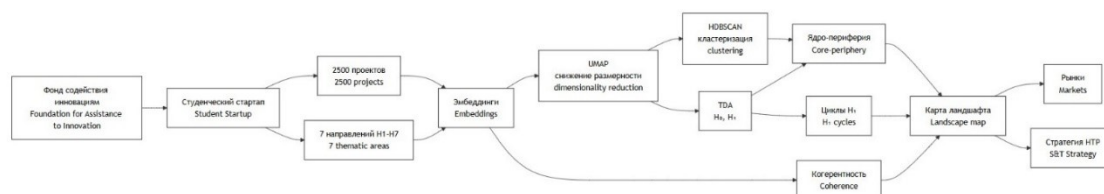
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, ORCID: 0000-0002-5750-7991, e-mail: mitrofanova_tv@mail.ru

This paper presents a study of the semantic landscape of student startups, defined as a system of implicit semantic connections emerging within student research and innovation activities. The study is motivated by the need to expand the analytical toolkit for examining textual descriptions of startups. We employ methods aimed at uncovering latent thematic associations and interdisciplinary patterns, thereby complementing traditional quantitative, classificatory, and bibliometric approaches. The dataset comprises the titles of 2500 projects that won the «Student Startup» competition organized by the Foundation for Assistance to Innovation. By integrating natural language processing methods (distributed semantic representations) and topological data analysis techniques (persistent homology, density-based clustering), we analyzed the semantic structure of the corpus. Applying dimensionality reduction and computational topology methods enabled the reconstruction of the hidden architecture of the semantic space. A core-periphery structure was identified: stable thematic cores (digital technologies, biotechnologies) are surrounded by localized interdisciplinary connections. Detected cyclic structures (H_1) are interpreted as topological markers of interdisciplinary «bridges»,

pinpointing instances of technological convergence. The study demonstrates that the semantic distribution of projects complements official classification systems by revealing latent connections in interdisciplinary domains. The findings align with the priorities of the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation, particularly objectives related to advancing the «data economy» and bioeconomy, as well as enabling technologies. We propose an approach to mapping the semantic landscape that allows for the identification of emerging market zones – areas where a high density of interdisciplinary connections coincides with the absence of stable thematic cores. This work confirms the potential of topological analysis for monitoring innovation ecosystems and may prove valuable for identifying growth points and designing support measures for student-led technological entrepreneurship.

Keywords: student entrepreneurship, startups, innovation projects, distributed semantic representations, topological data analysis, persistent homology, textual data analysis, technological convergence, interdisciplinary connections

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Развитие студенческого предпринимательства рассматривается как один из факторов формирования инновационной экономики и трансформации системы высшего образования. Студенческие стартапы выступают не только как экономические субъекты, но и как носители новых смыслов и моделей идентичности, формирующихся в рамках предпринимательских экосистем. Исследования эволюции студенческого предпринимательства фиксируют усложнение структуры таких экосистем, рост междисциплинарности и усиление роли нематериальных факторов развития [1, 2].

В научной литературе анализ стартап-экосистем преимущественно осуществляется с использованием библиометрических и количественных методов [3, 4]. Однако данные подходы не всегда позволяют выявлять латентные смысловые структуры и тематические взаимосвязи в текстовых описаниях проектов, особенно на ранних стадиях их жизненного цикла [5]. Между тем успешность стартапов определяется не только институциональными факторами, но и ценностными установками, мотивациями и стратегическими нарративами участников экосистемы [6]. Внутренний смысловой слой проектов – семантический ландшафт – остаётся недостаточно изученным.

Необходимость анализа скрытых структур в сложных социально-экономических системах обуславливает обращение к новым методологическим подходам. Одним из таких подходов является топологический анализ данных (Topological Data Analysis, TDA), позволяющий выявлять устойчивые формы связности в высокоразмерных и зашумлённых данных. Эффективность применения методов персистентной гомологии продемонстрирована в исследованиях финансовых рынков [7], сложных систем [8] и социальных феноменов [9].

В условиях цифровизации управления и обработки данных технологии искусственного интеллекта (ИИ) обретают особую значимость. Как подчёркивается в работе [10], применение ИИ, в частности нейросетевых моделей, в процессах государственно-частного партнёрства и проектного менеджмента способствует повышению качества управленческих решений и снижению рисков при реализации инфраструктурных и инновационных проектов. В свою очередь, исследование [11] обосновывает эффективность топологического анализа данных (TDA). Применение данного метода даёт возможность выделять инвариантные структуры и обеспечивать сохранность их топологических характеристик даже тогда, когда многомерные пространства подвергаются редукции. В работе [12] представлен алгоритм многоклассовой классификации, базирующийся исключительно на инструментарию TDA. Как показали авторы, такой подход сохраняет работоспособность в условиях значительного пересечения классов и при ярко выраженном дисбалансе объёмов выборок. Параллельно с эволюцией TDA не прекращается интенсивное развитие методов анализа естественного языка (NLP). Современные приёмы NLP, о чём свидетельствуют результаты [13], обеспечивают высокую эффективность при изучении семантической организации текстов. Так, например, сочетание тематического моделирования с векторными представлениями, как следует из [14], дало возможность выявить латентные тематические группы в описаниях проектной документации. С методологической точки зрения указанная задача близка к той, что связана с реконструкцией семантических пространств инновационных проектов.

Анализ работ, посвящённых факторам успешности стартапов, приводит к следующим выводам. Эффективность инновационных проектов зависит не столько от разрозненных параметров, сколько от их скоординированной конфигурации и сбалансированности интересов различных стейкхолдеров. В то же время фиксируется смысловой разрыв: представления основателей стартапов о том, что такое успех, расходятся с тем, как эту категорию воспринимают другие участники экосистемы. Данный разрыв актуализирует проблему анализа скрытых уровней коммуникации и смыслообразования [15].

Цель настоящего исследования – разработка и апробация комплексного подхода. Этот подход интегрирует методы обработки естественного языка и топологического анализа данных для изучения семантического ландшафта студенческих стартапов. Предмет исследования – методика анализа наименований стартап-проектов с применением персистентной гомологии, направленная на выявление скрытых семантических структур и междисциплинарных связей.

МЕТОДОЛОГИЯ

Материалом исследования послужили открытые данные конкурса «Студенческий стартап» (VI очередь) Фонда содействия инновациям [16], общий объем которых составил 2500 профинансированных проектов. Согласно положению о конкурсе [17], проекты распределяются по семи тематическим направлениям: цифровые технологии (Н1), медицина и технологии здоровьесбережения (Н2), новые материалы и химические технологии (Н3), новые приборы и интеллектуальные производственные технологии (Н4), биотехнологии (Н5), ресурсосберегающая энергетика (Н6), креативные индустрии (Н7).

В качестве основного объекта анализа использовался корпус текстов поля названий проектов, подвергнутый лингвистической предобработке и векторизации. Методологическую основу исследования составили методы компьютерной лингвистики, машинного обучения и топологического анализа данных. Для обработки текстовых данных применялись методы распределённых семантических представлений на основе русскоязычной модели *sentence-transformers (sbert_large_nlu_ru)*, при этом каждое наименование проекта преобразовывалось в вектор размерности 1024 (эмбединг). Снижение размерности осуществлялось методом UMAP с параметрами $n_neighbors = 15$ и $min_dist = 0,1$, создающим двумерные и трёхмерные проекции пространства эмбедингов при сохранении локальной структуры данных. Для кластеризации применялся алгоритм HDBSCAN. Топологический анализ данных проводился на основе вычисления персистентных гомологий и построения симплициальных комплексов Виториса – Рипса, что позволило выявить устойчивые топологические структуры в семантическом пространстве.

Для оценки внутренней однородности каждого тематического направления использовался коэффициент семантической когерентности (внутренней связности), вычисленный на основе эмбедингов названий проектов. Под когерентностью в задачах анализа текстов понимается степень смысловой близости объектов, образующих тематическую группу. В научной литературе предложены различные подходы к её количественному измерению. Наиболее распространённые из них основаны на анализе частоты совместной встречаемости термов PMI (pointwise mutual information) [18] или логарифме сглаженной условной вероятности совместной встречаемости термов (log-conditional-probability) [19]; в тематическом моделировании когерентность темы вычисляется как средняя попарная взаимная информация для заданного множества наиболее весомых термов темы [20]. С развитием методов глубинного обучения получили распространение подходы, основанные на анализе векторных представлений. В настоящем исследовании применялся метрический подход, основанный на анализе ближайших соседей в пространстве эмбедингов. Для каждого проекта рассчитывалась доля пяти ближайших соседей (по косинусной метрике), принадлежащих к тому же направлению. Итоговый коэффициент когерентности определялся как среднее арифметическое индивидуальных показателей всех проектов, входящих в данное направление:

$$Coh(H) = \frac{1}{|H|} \sum_{i \in H} \left(\frac{1}{k} \sum_{j \in N(i)} 1(dj = di) \right),$$

где $|H|$ – количество проектов в направлении H ;

$N(i)$ – множество индексов k ближайших соседей ($k = 5$) проекта i в пространстве семантических эмбедингов (исключая сам проект i);

di, dj – тематические направления проектов i и j соответственно;

$1(\bullet)$ – индикаторная функция, равная 1, если условие $dj = di$ истинно, и 0 в противном случае; близость между векторами проектов определялась с использованием косинусной метрики.

Значения коэффициента $Coh(H)$, близкие к единице, свидетельствуют о высокой смысловой компактности направления, тогда как низкие значения указывают на семантическую размытость его границ.

Для выявления плотностных семантических групп в пространстве эмбедингов применялся алгоритм иерархической кластеризации на основе оценки плотности распределения HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), позволяющий выявлять

устойчивые к шуму группы семантически схожих проектов [21]. Оценка качества кластеризации осуществлялась на основе таких метрик, как коэффициент силуэта (Silhouette), индекс Калински – Харабаса (Calinski – Harabasz) и индекс Дэвиса – Боулдина (Davies – Bouldin), характеризующих компактность и отделимость полученных кластеров. Дополнительно оценивалась степень соответствия автоматически выделенных кластеров исходной экспертной разметке с помощью скорректированного индекса Рэнда (ARI, Adjusted Rand Index) и нормированной взаимной информации (NMI, Normalized Mutual Information).

Для изучения топологической структуры семантического пространства проектов применялся метод персистентных гомологий. В основе метода лежит построение фильтрации симплициальных комплексов при возрастающем параметре λ . Персистентные гомологии нулевого порядка H_0 отслеживают компоненты связности: при увеличении λ точки данных объединяются, и компоненты «исчезают», сливаясь с другими. Персистентные гомологии первого порядка H_1 регистрируют рождение и гибель одномерных циклов – замкнутых петель, образованных рёбрами симплициального комплекса. Время жизни признака (персистентность) вычисляется как разность между параметром смерти ε_{death} и параметром рождения ε_{birth} . Построение симплициального комплекса Виториса – Рипса осуществлялось на основе матрицы попарных косинусных расстояний между эмбедингами названий стартап-проектов с максимальной размерностью симплексов, равной 2. Значение верхней границы фильтрации $\lambda_{max} = 1,0$ установлено на основании анализа эмпирического распределения попарных косинусных расстояний (минимальное значение составляет 0,024, а максимальное – 1,102). Такой выбор обеспечивает полный жизненный цикл всех топологических признаков – от возникновения до исчезновения. Построенная фильтрация легла в основу расчёта персистентных гомологий нулевого (H_0) и первого (H_1) порядков.

На рисунке 1 (левая часть) представлена диаграмма персистентности. Каждая точка на ней отвечает определённому топологическому признаку и имеет координаты (рождение, смерть). Компоненты связности (H_0) обозначены красным цветом, одномерные циклы (H_1) – синим. Чем дальше точка отстоит от диагонали ($birth = death$), тем больше время жизни соответствующего признака и, следовательно, выше его топологическая устойчивость. На диаграмме отчётливо видно скопление точек вблизи диагонали, что говорит о преобладании структур с малым временем жизни. Вместе с тем наличие удалённых точек, особенно в размерности H_0 , где среди прочих фиксируется одна бесконечная компонента связности (на рисунке 1 она отмечена символом $+\infty$), указывает на присутствие устойчивых семантических образований.

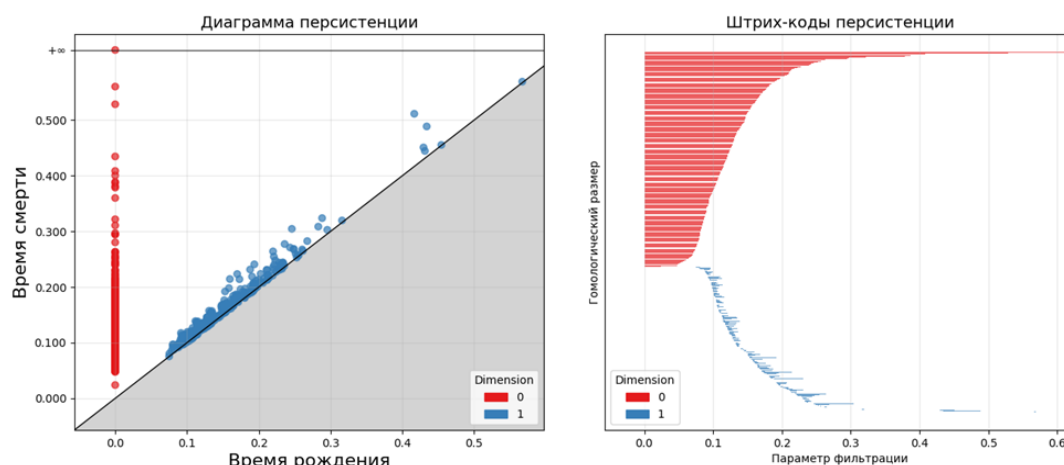


Рисунок 1 – Диаграмма персистентности и диаграмма штрих-кодов персистентных гомологий

Правая часть рисунка 1 содержит штрих-коды персистентности. Каждый горизонтальный отрезок обозначает временной интервал, в течение которого соответствующий топологический признак существует в процессе фильтрации комплекса. Визуальный анализ штрих-кодов непротиворечив с количественными показателями: хотя абсолютное большинство отрезков имеет небольшую протяжённость, фиксируются также отдельные долгоживущие H_0 -компоненты.

С целью количественного оценивания устойчивости выявленных топологических структур было проведено исследование распределений времени жизни признаков (персистентности). Рисунок 2 демонстрирует соответствующие диаграммы для конечных компонент связности (H_0) и для одномерных (H_1).

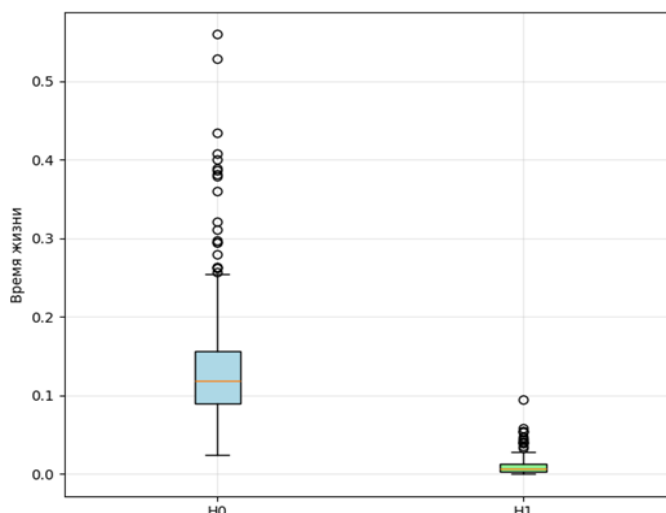


Рисунок 2 – Распределение времени жизни топологических признаков

Расчёт распределений персистентности для гомологий нулевого (H_0) и первого (H_1) порядков дал возможность получить числовые характеристики, описывающие устойчивость топологических признаков.

Персистентность каждого признака определялась как разность между параметром смерти и параметром рождения в фильтрации комплекса Рипса. Полученные распределения (рис. 2) анализировались с использованием описательных статистик: среднего арифметического (M), медианы (Me), максимального значения, а также визуально оценивалась форма распределения (наличие асимметрии, компактность).

ЭМПИРИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение проектов по тематическим направлениям характеризуется существенной неравномерностью. Доминирующее положение занимает лот Н1 «Цифровые технологии» (30,2 %, 754 проекта), что более чем вдвое превышает показатели остальных направлений. Далее следуют Н7 «Креативные индустрии» (17,6 %, 440 проектов), Н5 «Биотехнологии» (16,6 %, 416 проектов) и Н4 «Новые приборы и интеллектуальные производственные технологии» (14,3 %, 357 проектов). Направления Н3 «Новые материалы и химические технологии» и Н2 «Медицина и технологии здоровьесбережения» демонстрируют близкие значения – 9,7 % (243) и 9,4 % (234) соответственно. Наименьшая доля зафиксирована для лота Н6 «Ресурсосберегающая энергетика» – 2,2 % (56 проектов). Полученное распределение указывает на смещение фокуса студенческих инноваций в сторону цифровых технологий, креативных индустрий, биотехнологий и интеллектуальных производственных технологий. В совокупности эти направления составляют 78,7 % всех профинансированных проектов, что соответствует приоритетам, зафиксированным в стратегических документах технологического развития.

Таблица 1 содержит сведения о распределении стартап-проектов по семи тематическим направлениям, значения рассчитанных коэффициентов семантической когерентности и их содержательную интерпретацию.

Полученные значения коэффициента когерентности лежат в интервале от 0,211 до 0,676, что свидетельствует о заметной дифференциации направлений по степени внутренней смысловой однородности. Причём самые высокие показатели отмечены для цифровых технологий (0,676) и биотехнологий (0,640). Это говорит о существовании компактных семантических кластеров с относительно чёткими границами. Направление «Новые материалы и химические технологии» демонстрирует умеренную когерентность (0,597). Показатели среднего уровня (0,415–0,497) зафиксированы для медицины, креативных индустрий и интеллектуальных производственных технологий, что указывает на частичное смысловое перекрытие с другими тематическими рубриками. Наиболее низкое значение (0,211) характерно для Н6 «Ресурсосберегающая энергетика». Проекты, попавшие в эту категорию, семантически неоднородны и обнаруживают тяготение к иным тематическим группам.

Следующим шагом стало применение алгоритма HDBSCAN с параметрами $\text{min_cluster_size} = 10$ и $\text{min_samples} = 10$. В результате выделены два существенно различающихся по объёму кластера. Оценить качество полученного разбиения позволяют внутренние метрики: силуэтный коэффициент равен 0,810, индекс Калински – Харабаса составляет 1322,4, индекс Дэвиса – Боулдина – 0,143. Эти значения подтверждают компактность кластеров и их хорошую отделимость друг от друга. Результаты кластеризации выглядят следующим образом. Основной массив проектов содержит 2468 единиц, или 98,7 % всех объектов – консолидирован в крупный кластер. Малый же кластер насчитывает всего 32 проекта (1,3 %), которые оказываются семантически изолированными. Изучение состава

малого кластера позволяет сделать вывод, что причина обособления кроется в узкой тематической специализации таких проектов, а также в употреблении специфических терминологических оборотов и брендированных наименований, например, ReFlex Max (направление H2), LookSpace (направление H1), Wagon Bid (H1), NFC-Pass (H1) и подобные.

Таблица 1 – Интерпретация коэффициентов когерентности направлений конкурса

Направление (лот)	Доля проектов, %	Коэффициент когерентности	Интерпретация значений когерентности
Цифровые технологии (H1)	30,2	0,676	Высокая семантическая однородность; проекты образуют компактные группы (ИИ, SaaS, VR/AR), хорошо отделимы от иных направлений
Медицина и технологии здоровьесбережения (H2)	9,4	0,497	Когерентность среднего уровня; проекты частично пересекаются с другими тематическими группами
Новые материалы и химические технологии (H3)	9,7	0,597	Когерентность умеренная; проекты тематически близки, однако внутри направления наблюдается вариативность
Новые приборы и интеллектуальные производственные технологии (H4)	14,3	0,415	Когерентность средняя; тематический охват шире, имеются пересечения с другими направлениями
Биотехнологии (H5)	16,6	0,640	Высокая когерентность; проекты объединяет биомедицинская и агротематика
Ресурсосберегающая энергетика (H6)	2,2	0,211	Низкая когерентность; проекты семантически разнородны
Креативные индустрии (H7)	17,6	0,480	Когерентность средняя; смешанное тематическое покрытие, внутренняя связность умеренная

На последующем этапе исследования авторы выполнили топологический анализ семантического пространства, сформированного названиями стартап-проектов. Он выявил неоднородную структуру. Персистентность компонент связности (H_0) существенно превышает персистентность одномерных циклов (H_1), что подтверждается значениями медианного времени жизни 0,119 для H_0 и 0,007 для H_1 , а также средними значениями 0,133 и 0,010 соответственно. На рисунке 2 наличие выраженного правостороннего хвоста в распределении H_0 (максимальное время жизни достигает 0,560) указывает на существование устойчивых тематических ядер – групп проектов с высокой семантической когерентностью. Они соответствуют направлениям с чётко выраженной терминологией (цифровые технологии, биотехнологии). Наличие общего семантического поля, объединяющего все проекты, обеспечивается одной бесконечной компонентой, фиксируемой на диаграмме персистентности (рис. 1, красная точка на бесконечности). О локальной природе междисциплинарных связей говорит то, что распределение H_1 имеет компактный характер (более 95 % циклов существуют менее 0,03), наиболее устойчивые из них представлены в таблице 2.

Обнаружены циклические структуры (H_1), которые подтверждают наличие нетривиальных семантических конфигураций. Данные циклы могут интерпретироваться как топологические маркеры наличия междисциплинарных связей, то есть проекты из различных направлений связаны в замкнутые тематические конфигурации – циклы. В таблице 2 приведены пять циклов H_1 с наибольшей персистентностью (максимальное значение равно 0,0946). Циклы, персистентность которых заметно превосходит медиану (0,007), могут трактоваться как структурно значимые семантические «мостики», соединяющие различные технологические направления. В качестве примера можно привести связь цифровых технологий с медициной через инструменты ИИ-диагностики, а также зону пересечения материаловедения с приборостроением.

Для подавляющей части циклов H_1 характерна невысокая персистентность: медианное время их существования составляет 0,007. Из этого следует, что междисциплинарные взаимодействия в исследуемой выборке имеют по преимуществу локальную природу и не выходят на уровень устойчивых глобальных структур.

Таблица 2 – Циклы с наибольшей персистентностью

Персистентность	Рождение	Смерть	Интерпретация
0,0946	0,4165	0,5112	Связь между Н1 (Цифровые технологии) и Н2/Н5 (Медицина/Биотехнологии) через цифровое здравоохранение, ИИ-диагностику, биоинформатику
0,0584	0,2460	0,3045	Пересечение Н3 (Материалы) и Н4 (Приборы) – например, разработка новых сенсоров на базе наноматериалов
0,0546	0,1597	0,2144	Связь Н7 (Креативные индустрии) и Н1 (IT) через AR/VR-проекты, игровые технологии, цифровое искусство
0,0546	0,4338	0,4884	Мост между Н5 (Биотехнологии) и Н6 (Энергетика) – например, биоэнергетика, микробные топливные элементы
0,0534	0,1699	0,2234	Связь Н1 (IT) и Н4 (Производственные технологии) – промышленный ИИ, цифровые двойники, автоматизация

Таким образом, можно констатировать, что семантическое пространство стартап-проектов организовано по ядерно-периферийному принципу. Немногочисленные устойчивые тематические ядра (отличающиеся высокой персистентностью H_0) окружают локальные и эпизодические междисциплинарные связи, которым соответствует низкая персистентность H_1 .

На рисунке 3 представлена визуализация топологической структуры семантического пространства. Каждая точка соответствует одному проекту, окрашена в соответствии с его направлением (Н1–Н7). Серые линии соединяют точки с тремя ближайшими соседями ($k = 3$) в исходном 1024-мерном эмбединг-пространстве, отражая локальные топологические связи между проектами.

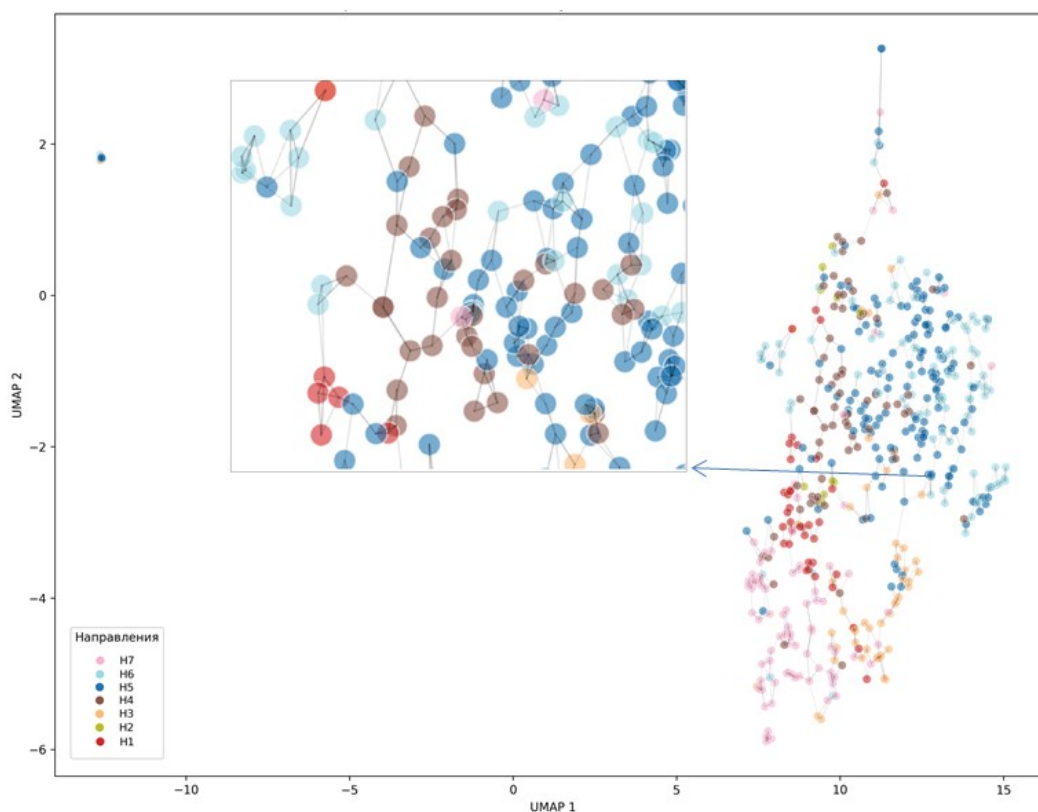


Рисунок 3 – Топология семантического пространства стартапов (UMAP-проекция)

Проекты направлений «Цифровые технологии» (Н1) и «Биотехнологии» (Н5) формируют наиболее компактные области, что подтверждает высокую семантическую когерентность (табл. 1). Проекты направлений «Медицина и технологии здоровьесбережения» (Н2), «Новые материалы и химические технологии» (Н3), «Новые приборы и интеллектуальные производственные технологии» (Н4) и «Креативные индустрии» (Н7) распределены более диффузно и демонстрируют взаимное перекрытие, что свидетельствует о междисциплинарном характере и размытости тематических границ. Немногочисленными и периферийно расположенными точками представлено направление Н6 (Ресурсосберегающая энергетика), что говорит о низкой внутренней связности и фрагментарности данного тематического кластера.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты позволяют перейти от установления структурных особенностей семантического поля студенческих стартапов к их содержательной интерпретации в части закономерностей развития инновационных систем и методологии анализа текстовых данных.

Выявленная в ходе анализа конфигурация семантического пространства отражает свойство инновационных экосистем на ранних стадиях формирования – сочетание уже сложившихся, терминологически устоявшихся доменов (например, цифровые сервисы и биоинженерия) с обширной зоной поисковых, междисциплинарных инициатив. Высокая степень пространственного разделения и топологической устойчивости «цифрового» и «биотехнологического» ядер может объясняться не только зрелостью данных дисциплин, но и наличием устоявшихся стандартов описания проектов, транслируемых через образовательные программы и профессиональные сообщества.

Обнаруженные циклы первого порядка H_1 трактуются авторами как маркер начального этапа технологической конвергенции. Для большинства зафиксированных связей характерна невысокая персистентность. Это говорит о том, что междисциплинарный перенос в студенческих проектах зачастую сводится к заимствованию методов (например, применению машинного обучения в материаловедении) и не сопровождается формированием устойчивых гибридных онтологий. Исключения составляют те направления, где конвергенция уже породила узнаваемые нарративы – например, «цифровое здравоохранение» или «биоэнергетика». Именно они на диаграммах персистентности проявляются в виде долгоживущих циклов.

Семантическая размытость и нечёткость границ у таких направлений, как «Новые приборы и интеллектуальные производственные технологии» (H_4) или «Ресурсосберегающая энергетика» (H_6), допускает двойственное истолкование. С одной стороны, в этом отражается динамичный характер развития соответствующих научно-технических областей. С другой – это следствие их междисциплинарной природы, при которой строгие таксономические разграничения начинают складываться лишь по мере накопления систематизированного знания и уточнения понятийного аппарата.

Предлагаемый авторами подход дополняет традиционные количественные, классификационные и библиометрические методы. Его преимущество заключается в сохранении информации о непрерывной геометрии семантического многообразия. Классические методы, как правило, вынужденно упрощают структуру исходных данных, сводя её к набору обособленных групп. Персистентная же гомология позволяет сохранить сведения о естественной связности данных, благодаря чему становятся возможными выявление переходных зон («мостиков») между плотными областями семантического пространства, а также обнаружение участков разрежения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в исследовании методология, опирающаяся на топологический анализ данных, реализует комплексный подход к изучению семантической организации корпуса студенческих стартапов. Данный подход объединяет методы обработки естественного языка, нелинейного снижения размерности и вычислительной топологии (в том числе персистентная гомология и алгоритмы плотностной кластеризации). Анализ названий проектов победителей конкурса «Студенческий стартап» (2025 г.) дал возможность восстановить скрытую структуру инновационного ландшафта и определить его основные топологические характеристики.

Практическая ценность полученных результатов связана с возможностью построения карты стартап-проектов, где позиция проекта определяется не только его тематической принадлежностью, но и топологической устойчивостью окружающего семантического поля. Подобное картографирование позволяет выявлять области, в которых низкая концентрация действующих проектов сочетается с высокой плотностью эпизодических H_1 -связей. Такие зоны правомерно рассматривать как маркеры зарождающихся рынков. Они указывают на пространства, где междисциплинарный поиск уже ведётся, но рыночная ниша (то есть устойчивое тематическое ядро) пока остаётся незаполненной.

Список источников

1. Passavanti, C. The evolution of student entrepreneurship : State of the art and emerging research direction / C. Passavanti, C. Ponsiglione, S. Primario, P. Rippa // The International Journal of Management Education. – 2023. – Vol. 21, № 2. – P. 100820. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2023.100820>.
2. Tanna, S. S. Mapping the evolution of campus startup ecosystem: a 25-year bibliometric review (1998–2023) / S. S. Tanna, N. Mandavia // J. Glob. Entrepr. Res. – 2024. – Vol. 14, № 45. <https://doi.org/10.1007/s40497-024-00418-z>.
3. Mohammadi, N. Mapping the knowledge domain and emerging trends of sustainable startups / N. Mohammadi, E. Soltanifar // Discov Sustain. – 2025. – Vol. 6, № 1044. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01949-5>.
4. Cao, L. Modularity, Architectural Innovation, and New Venture Success / L. Cao, Z. Chen, J. Evans // arXiv preprint. – 2024. – 90 p. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.15042>.
5. Bzhalava, L. Data-based startup profile analysis in the European smart specialization strategy: a text mining approach / L. Bzhalava, J. Kaivo-oja, S. S. Hassan // Legal Aspects of European Integration. – 2018. – № 12. – P. 118–128. <https://doi.org/10.5755/j01.eis.0.12.21869>.

6. Бареева, И. А. Перспективы развития стартап-экосистемы России в контексте глобальных инновационных процессов / И. А. Бареева, Е. В. Комиссарова, А. А. Голикова и др. // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – № 8, т. 3. – С. 185–195. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.08.03.019>.
7. Yen, P. T.-W. Using topological data analysis (TDA) and persistent homology to analyze the stock markets in Singapore and Taiwan / P. T.-W. Yen, S. A. Cheong // *Frontiers in Physics*. – 2021. – Vol. 9. – Art. 572216. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.572216>.
8. Ключников, И. К. Топологический метод анализа финансовых временных рядов и обеспечения безопасности финансовых данных / И. К. Ключников, А. И. Ключникова // *Экономические науки*. – 2024. – Т. 1, № 239. – С. 273–284. <https://doi.org/10.14451/1.239.273>.
9. Godwin, A. Using topological data analysis in social science research: unpacking decisions and opportunities for a new method / A. Godwin, A. R. H. Thielmeyer, J. A. Rohde, D. Verdin, B. S. Benedict, J. Doyle. – Purdue University, 2018.
10. Рудницкий, А. В. Роль технологических инноваций и искусственного интеллекта в межсекторальной интеграции экономических систем / А. В. Рудницкий // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*. – 2025. – № 3. – С. 113–124. <https://doi.org/10.17586/2310-1172-2025-18-3-113-124>.
11. Cheng, L. The Application of Topological Data Analysis in Practice and Its Effectiveness / L. Cheng // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 214. – P. 03034. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021403034>.
12. Kindelan, R. A topological data analysis based classifier / R. Kindelan, J. Frías, M. Cerda et al. // *Adv. Data Anal. Classif.* – 2024. – Vol. 18. – P. 493–538. <https://doi.org/10.1007/s11634-023-00548-4>.
13. Платонов, Е. Н. Семантический анализ отзывов об организациях методами машинного обучения / Е. Н. Платонов, И. Р. Мартынова // *Моделирование и анализ данных*. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 7–26. <https://doi.org/10.17759/mda.2024140101>.
14. Митрофанова, Т. В. Тематическое моделирование грантовых проектов как инструмент управления социальным развитием региона / Т. В. Митрофанова, А. В. Христофорова // *Oeconomia et Jus*. – 2025. – № 4. – С. 25–37. <https://doi.org/10.47026/2499-9636-2025-4-25-37>.
15. Лопухин, А. В. инновационной экосистемы как ключ к успешному развитию российских финтех-стартапов / А. В. Лопухин, Е. А. Плаксенков // *Мир новой экономики*. – 2025. – Т. 19, № 4. – С. 47–60. <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2025-19-4-47-60>.
16. Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям). URL: <https://fasie.ru/>.
17. Положение о конкурсе «Студенческий стартап» (очередь VI). Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. – 2025. – URL: <https://fasie.ru/upload/docs/Положение%20СтС-6.pdf>.
18. Newman, D. Evaluating topic models for digital libraries / D. Newman, Y. Noh, E. Talley, S. Karimi, T. Baldwin // *Proceedings of the 10th annual joint conference on Digital libraries*. – 2010. – P. 215–224. <https://doi.org/10.1145/1816123.1816156>.
19. Mimno, D. Optimizing semantic coherence in topic models / D. Mimno, H. Wallach, E. Talley, M. Leenders, A. McCallum // *Proceedings of the 2011 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. – 2011. – P. 262–272.
20. Röder, M. Exploring the space of topic coherence measures / M. Röder, A. Both, A. Hinneburg // *Proceedings of the Eighth ACM International Conference on Web Search and Data Mining*. – 2015. – P. 399–408.
21. McInnes, L. Accelerated Hierarchical Density Based Clustering / L. McInnes, J. Healy // *2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*. – New Orleans, LA, USA, 2017. – P. 33–42. <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2017.12>.

References

1. Passavanti, C., Ponsiglione, C., Primario, S., Rippa, P. The evolution of student entrepreneurship: State of the art and emerging research direction. *The International Journal of Management Education*, 2023, vol. 21, no. 2, p. 100820. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2023.100820>.
2. Tanna, S. S., Mandavia N. Mapping the evolution of campus startup ecosystem: a 25-year bibliometric review (1998–2023). *Journal of Global Entrepreneurship Research*, 2024, vol. 14, no. 45. <https://doi.org/10.1007/s40497-024-00418-z>.
3. Mohammadi, N., Soltanifar, E. Mapping the knowledge domain and emerging trends of sustainable startups. *Discover Sustainability*. 2025, vol. 6, no. 1044. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01949-5>.
4. Cao, L., Chen, Z., Evans, J. Modularity, Architectural Innovation, and New Venture Success. *arXiv preprint*. 2024. 90 p. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.15042>.
5. Bzhalava, L., Kaivo-oja, J., Hassan, S. S. Data-based startup profile analysis in the European smart specialization strategy: a text mining approach. *Legal Aspects of European Integration*, 2018, no. 12, pp. 118–128. <https://doi.org/10.5755/j01.eis.0.12.21869>.
6. Bareeva I. A., Komissarova E. V., Golikova A. A., et al. Prospects for the development of the startup ecosystem in Russia in the context of global innovation processes. *Economics and Management: Problems, Solutions*, 2025, no. 8, vol. 3, pp. 185–195 (In Russ.). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.08.03.019> (In Russ.).
7. Yen, P. T.-W., Cheong, S. A. Using topological data analysis (TDA) and persistent homology to analyze the stock markets in Singapore and Taiwan. *Frontiers in Physics*, 2021, vol. 9, art. 572216. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.572216>.
8. Klyuchnikov, I. K., Klyuchnikova, A. I. Topological method for analysis of financial time series and ensuring security of financial data. *Economic Sciences*, 2024, vol. 1, no. 239, pp. 273–284 (In Russ.). <https://doi.org/10.14451/1.239.273> (In Russ.).

9. Godwin, A., Thielmeyer, A. R. H., Rohde, J. A., Verdin, D., Benedict, B. S., Doyle, J. *Using topological data analysis in social science research: unpacking decisions and opportunities for a new method*. Purdue University. 2018.
10. Rudnitskii, A. V. The role of technological innovations and artificial intelligence in intersectoral integration of economic systems. *Scientific Journal of NRU ITMO. Series «Economics and Environmental Management»*, 2025, no. 3, pp. 113–124 (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/2310-1172-2025-18-3-113-124> (In Russ.).
11. Cheng, L. The Application of Topological Data Analysis in Practice and Its Effectiveness. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 214, p. 03034. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021403034>.
12. Kindelan, R., Frías, J., Cerda, M., et al. A topological data analysis based classifier. *Advances in Data Analysis and Classification*, 2024, vol. 18, pp. 493–538. <https://doi.org/10.1007/s11634-023-00548-4>.
13. Platonov, E. N., Martynova, I. R. Semantic analysis of reviews about organizations using machine learning methods. *Modeling and Data Analysis*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 7–26 (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/mda.2024140101> (In Russ.).
14. Mitrofanova, T. V., Khristoforova, A. V. Topic modeling of grant projects as a tool for managing social development of a region. *Oeconomia et Jus.*, 2025, no. 4, pp. 25–37. <https://doi.org/10.47026/2499-9636-2025-4-25-37> (In Russ.).
15. Lopukhin, A. V., Plaksenkov, E. A. Improving the innovation ecosystem as a key to the successful development of Russian fintech startups. *The World of New Economy*, 2025, vol. 19, no. 4, pp. 47–60. <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2025-19-4-47-60> (In Russ.).
16. *Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology (Foundation for Innovation Support)*. Available at: <https://fasie.ru/> (In Russ.).
17. *Regulations for the «Student Startup» competition (round VI). Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology*, 2025. Available at: <https://fasie.ru/upload/docs/Положение%20CrC-6.pdf> (In Russ.).
18. Newman, D., Noh, Y., Talley, E., Karimi, S., Baldwin, T. Evaluating topic models for digital libraries. *Proceedings of the 10th Annual Joint Conference on Digital Libraries*, 2010, pp. 215–224. <https://doi.org/10.1145/1816123.1816156> (In Russ.).
19. Mimno, D., Wallach, H., Talley, E., Leenders, M., McCallum, A. Optimizing semantic coherence in topic models. *Proceedings of the 2011 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 2011, p. 262–272.
20. Röder, M., Both, A., Hinneburg, A. Exploring the space of topic coherence measures. *Proceedings of the Eighth ACM International Conference on Web Search and Data Mining*, 2015, pp. 399–408.
21. McInnes, L., Healy, J. Accelerated Hierarchical Density Based Clustering. *2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*. New Orleans, LA, USA, 2017, pp. 33–42. <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2017.12>.

Статья поступила в редакцию 22.04.2026; одобрена после рецензирования 14.05.2026; принята к публикации 19.05.2026.

The article was submitted 22.04.2026; approved after reviewing 14.05.2026; accepted for publication 19.05.2026.

УДК 004.6:004.021

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.007

СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ

Дмитриева Лариса Юрьевна, Иркутский научно-исследовательский технический университет, 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-3096-3778, e-mail: dlj-2011@mail.ru

В современных условиях роста объёмов неструктурированной информации интуитивный выбор форм визуализации часто приводит к искажению смысла, что обусловлено отсутствием единой методологии, связывающей семантическую трансформацию текста с графическим представлением. Целью работы является разработка системной модели преобразования неструктурированных данных в интерпретируемые визуальные формы. В исследовании использованы методы системного анализа, моделирования и кейс-метод. Научная новизна заключается в интеграции семиступенчатого цикла трансформации и шестиступенчатого алгоритма выбора визуальных форм в единый управляемый процесс $S = \{X, Z, Y, F, Q\}$. Введён комплекс критериев качества Q (адекватность, точность, когнитивная эффективность, воспроизводимость), переводящий визуализацию из субъективной практики в объект системного управления. Эмпирическая апробация на наборах от 12 до 180 текстовых утверждений подтвердила масштабируемость модели. Пределы точности агрегации обеспечены строгим калиброванием осей и пропорциональным масштабированием, исключающим искажения данных. Выявлено, что целенаправленный подбор диаграмм позволяет обнаруживать латентные паттерны и структурные асимметрии, недоступные при табличном анализе. Надёжность результатов обоснована верификацией по критериям Q и минимизацией когнитивной нагрузки посредством принципов гештальт-психологии. Разработанная модель обеспечивает методологическую строгость аналитических процедур. Рекомендуется её внедрение в образовательные программы, практику построения управленческих дашбордов и научную коммуникацию для повышения объективности и наглядности выводов.

Ключевые слова: визуализация данных, трансформация данных, неструктурированные данные, системная модель, методология анализа данных

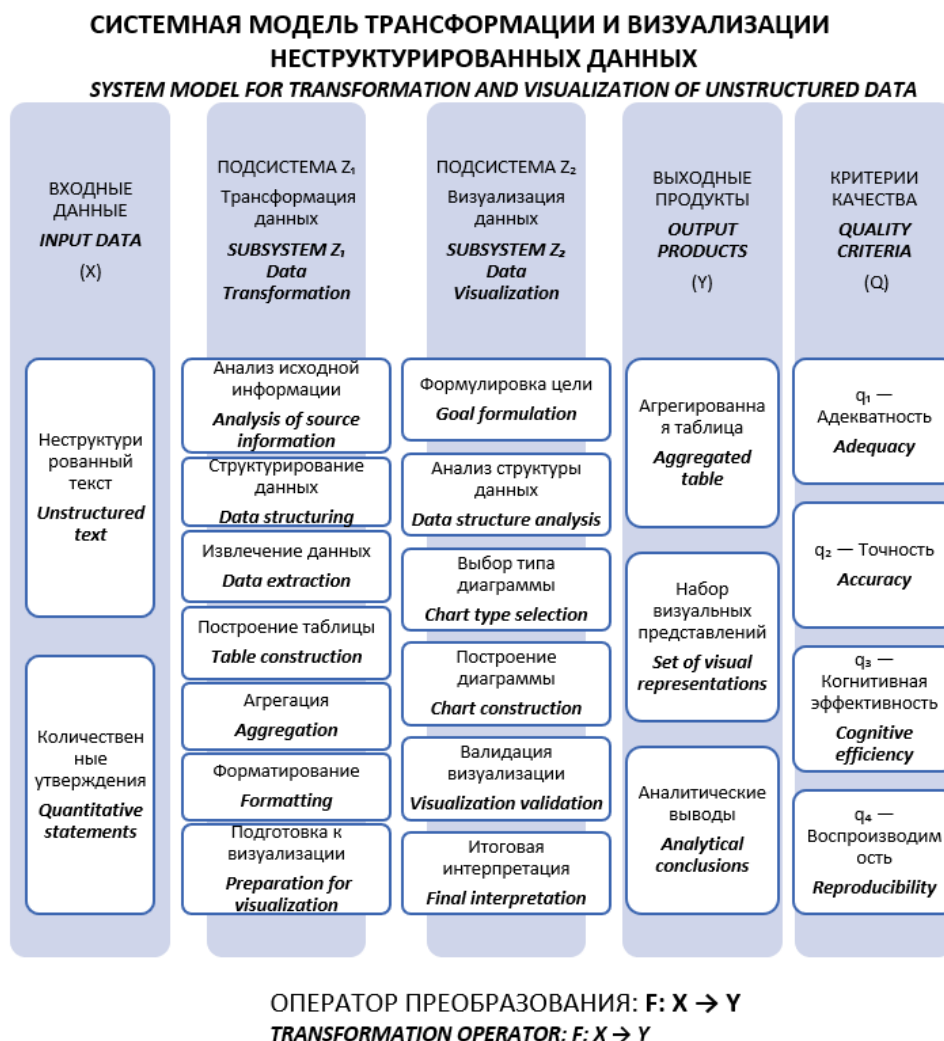
SYSTEM MODEL OF TRANSFORMATION AND VISUALIZATION OF UNSTRUCTURED DATA

Dmitrieva Larisa Yu., Irkutsk Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0002-3096-3778, e-mail: dlj-2011@mail.ru

In today's rapidly growing environment of unstructured information, intuitive choices of visualization forms often lead to distorted meaning, due to the lack of a unified methodology linking the semantic transformation of text with graphical representation. The goal of this work is to develop a systemic model for transforming unstructured data into interpretable visual forms. The study utilized methods of systems analysis, modeling, and case studies. The scientific novelty lies in the integration of a seven-step transformation cycle and a six-step algorithm for selecting visual forms into a single, manageable process $S = \{X, Z, Y, F, Q\}$. A set of quality criteria, Q (adequacy, accuracy, cognitive efficiency, reproducibility), is introduced, transforming visualization from a subjective practice into an object of systemic management. Empirical testing on datasets ranging from 12 to 180 text statements confirmed the model's scalability. The aggregation accuracy limits are ensured by rigorous axis calibration and proportional scaling, eliminating data distortions. It was found that targeted selection of diagrams enables the discovery of latent patterns and structural asymmetries inaccessible through tabular analysis. The reliability of the results is substantiated by verification using Q criteria and minimizing cognitive load using Gestalt psychology principles. The developed model ensures methodological rigor in analytical procedures. Its implementation in educational programs, management dashboard practices, and scientific communication is recommended to enhance the objectivity and clarity of findings.

Keywords: data visualization, data transformation, unstructured data, system model, data analysis methodology

Graphical annotation (Графическая аннотация)



В условиях цифровизации различных областей и роста объёмов информации возрастает роль системного анализа данных. Особую актуальность приобретают процессы трансформации неструктурированных данных в пригодные для анализа формы и их визуализация. Исходная информация зачастую представлена в неструктурированной, текстовой форме, требующей систематизации и адаптации для интерпретации [1]. В этой связи ключевое значение приобретают процессы трансформации и визуализации данных, обеспечивающие переход от хаотичного описания к структурированному знанию.

Актуальность исследования обусловлена ростом объёмов цифровой информации и необходимостью её эффективной интерпретации в образовании, науке, бизнесе и управлении. Несмотря на широкое распространение инструментов визуализации, отсутствует единая методологическая основа, интегрирующая этапы трансформации данных и принципы целенаправленного выбора визуальных форм. Часто визуализация строится интуитивно, без привязки к аналитической цели, что ведёт к искажению смысла или снижению информативности [2].

Современные подходы к анализу данных, такие как CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining) [3], включают шесть этапов: бизнес-понимание, понимание данных, предобработку и трансформацию данных [4, 5], моделирование, оценку и внедрение. Особое внимание уделяется этапам эксплораторного анализа данных (EDA) и визуализации или методологии Коула Нафлик [6] и С. Фью [7], фокусируются либо на этапах анализа данных, либо на дизайн-принципах визуализации, но не обеспечивают формализованной связи между семантической трансформацией текста и выбором визуальной формы. В настоящей работе устраняется указанное ограничение за счёт разработки интегрированной системной модели, построенной на принципах системного анализа и обеспечивающей сквозную логическую связь от исходного текстового описания до интерпретируемого графического

представления. Близкие по духу попытки интеграции структурного моделирования и информационного поля предприняты, например, в работе [8], где предложен системно-иерархический подход к формированию информационных слоёв и когнитивных карт.

Целью исследования является разработка и обоснование системной модели трансформации и визуализации неструктурированных данных на основе принципов системного анализа.

Задачи исследования: формализовать систему трансформации и визуализации данных как целостный управляемый процесс $S = \{X, Z, Y, F, Q\}$, разработать семистапную модель трансформации данных и шестистапную модель выбора визуализации, ввести и обосновать множество критериев качества функционирования системы, продемонстрировать работоспособность модели на эмпирическом кейсе с количественными данными и оценить генеративный потенциал визуализации как инструмента порождения новых знаний. Объект исследования – процессы работы с неструктурированными данными, включающие их трансформацию и визуализацию. Предмет исследования – методологические основы и этапы системной трансформации данных, а также принципы построения эффективной визуализации, соответствующей критериям системного анализа. Методы исследования: системный анализ, моделирование, кейс-метод, сравнительный анализ.

СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ

Под системой трансформации и визуализации данных понимается целостный, управляемый процесс $S = \{X, Z, Y, F, Q\}$. Предложена семиступенчатая модель трансформации (рис. 1).



Рисунок 1 – Структура системной модели трансформации и визуализации данных

Блок-схема на рисунке 1 отражает сквозной процесс обработки неструктурированных данных от входа до аналитического результата, где:

– X – множество входных данных, представленных в виде неструктурированных текстовых утверждений, содержащих количественные сведения (например, фразы вида «[Субъект] вырастил [X] тонн [Объект]»);

– $Z = \{Z_1, Z_2\}$ – совокупность взаимосвязанных подсистем: Z_1 – подсистема трансформации данных (семиэтапный цикл: анализ текста → структурирование → агрегация → подготовка к визуализации и др.) и Z_2 – подсистема визуализации (шестиэтапный цикл: формулировка цели → выбор типа диаграммы → построение → валидация и др.);

– Y – множество выходных продуктов системы, включающее: структурированную агрегированную таблицу, набор визуальных представлений (гистограмма, круговая диаграмма, линейный график и др.) и верифицированные аналитические выводы, соответствующие поставленной задаче;

– $F: X \rightarrow Y$ – оператор преобразования, реализуемый через последовательное выполнение этапов;

– $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\}$ – множество критериев качества функционирования системы;

– q_1 – адекватность (соответствие типа визуализации аналитической цели);

– q_2 – точность (отсутствие искажений в масштабе, осях, этикетках);

– q_3 – когнитивная эффективность (способность визуального представления обеспечивать интуитивно понятное и непосредственное восприятие ключевого аналитического сообщения без необходимости дополнительных мыслительных операций);

– q_4 – воспроизводимость (возможность повторить процесс на новых данных по тем же правилам).

Процедурное ядро подсистемы Z_1 представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Системная модель трансформации данных

Этап	Описание операции	Результат этапа
Анализ исходной информации	Чтение и семантическое разметка текста	Выявление сущностей и атрибутов
Определение структуры данных	Выбор измерений: строки (категории), столбцы (субъекты)	Логическая схема таблицы
Извлечение данных	Преобразование фраз вида «[Субъект] вырастил [X] тонн [Объект]» в тройки	Структурированные записи
Построение сводной таблицы	Формирование двумерной матрицы (структура)	Табличное представление
Агрегация	Расчёт итогов по строкам, столбцам и общего значения	Аналитически завершённая таблица
Форматирование	Применение границ, цветов, выравнивания	Повышение читаемости
Подготовка к визуализации	Отбор данных для конкретных типов диаграмм	Готовность к графическому отображению

Подсистема Z_2 реализуется через методологию целенаправленного выбора визуализации, изложенного в таблице 2, где ключевым элементом является сопоставление аналитического вопроса (сравнение, доля, динамика) с типом диаграммы.

Таблица 2 – Процесс выбора визуализации по методологическим критериям

Этап	Содержание	Обоснование выбора
Формулировка аналитического вопроса	Определение типа задачи: сравнение, доля, динамика	База для выбора типа визуализации
Анализ структуры данных	Оценка количества категорий, наличия временных-порядковых переменных	Исключение неадекватных типов (например, круговая диаграмма при более 5 категориях)
Сопоставление задачи и типа диаграммы	Сравнение (гистограмма), доля (круговая), тренд (линейный график)	Соответствие формы содержанию
Построение диаграммы	Назначение осей, легенды, подписей	Техническая реализация
Валидация визуализации	Проверка соответствия ключевого сообщения воспринимаемому образу	Обеспечение когнитивной эффективности
Итоговая интерпретация	Вывод, подтверждённый графиком	Завершение аналитического цикла

Таким образом, предложенная системная модель интегрирует процессы трансформации и визуализации данных в единый управляемый цикл, где последовательное выполнение семи этапов структурирования информации и шести этапов целенаправленного выбора визуальной формы, оцениваемое по критериям множества Q, обеспечивает методологическую строгость и воспроизводимость аналитических выводов [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Работоспособность предложенной системной модели $S = \{X, Z, Y, F, Q\}$ подтверждена на двух эмпирических кейсах различной структурной сложности, демонстрирующих её универсальность и масштабируемость.

Кейс 1: Анализ распределения сельскохозяйственного урожая. Исходные данные (X) представлены в виде 12 количественных утверждений о сборе овощей тремя фермерскими хозяйствами. На этапе трансформации (Z1) применён семиэтапный цикл: семантическая разметка → определение структуры → извлечение данных → построение сводной таблицы → агрегация → форматирование → подготовка к визуализации. Результатом стала агрегированная таблица, содержащая итоговые показатели: общий урожай по хозяйствам («Фермер 1» – 83 тонны, «Фермер 2» – 89 тонн, «Фермер 3» – 85 тонн) и распределение по видам культур (капуста – 120 тонн (46,7 %), морковь – 70 тонн (27,2 %), огурцы – 42 тонны (16,3 %), лук – 25 тонн (9,7 %)), совокупный объём урожая – 257 тонн, как показано на рисунке 2.

На этапе визуализации (Z2) сформулированы три аналитических вопроса, каждому из которых сопоставлен оптимальный тип диаграммы:

- сравнение абсолютных объёмов → гистограмма с группировкой (выявлено лидерство «Фермера 2»);
- анализ структурных пропорций → круговая диаграмма (капуста составляет почти половину общего урожая);
- выявление паттернов распределения → линейный график (обнаружена асимметрия ассортимента у «Фермера 2» и сбалансированность у «Фермера 3»).

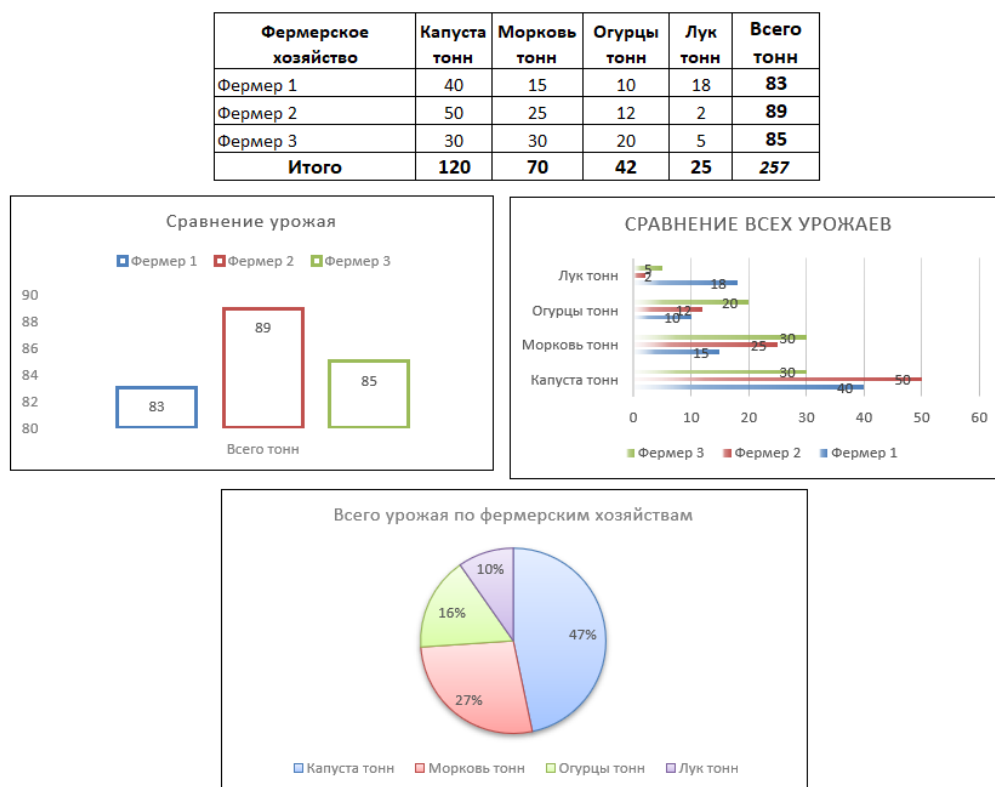


Рисунок 2 – Сводный аналитический отчёт по урожаю овощей фермерских хозяйств: сравнительный анализ объёмов, структуры и распределения

Ключевой результат демонстрации: линейный график выявил асимметрию в аграрной специализации «Фермера 2» (максимальный урожай при минимальном разнообразии культур), что не было очевидно при анализе исходной таблицы. Это подтверждает генеративную функцию визуализации – способность порождать новые знания через изменение формы представления данных.

Кейс 2: Анализ региональных продаж компании N. Для проверки масштабируемости модели использован набор данных иерархической структуры: неструктурированный текстовый отчёт о продажах в трёх странах и 11 городах (Россия, Белоруссия, Казахстан; объёмы в тыс. руб.).

На этапе Z1 (трансформация) реализован полный цикл:

- семантическая разметка: выделены сущности «Страна», «Город», «Объём продаж»;
- структурирование: построена двумерная таблица с вложенной группировкой (страна → город);
- агрегация: рассчитаны итоги по странам (Россия – 208 тыс. руб., Белоруссия – 78 тыс. руб., Казахстан – 169 тыс. руб.) и общий объём (455 тыс. руб.).

На этапе Z2 (визуализация) аналитический вопрос «сравнение показателей в рамках иерархической структуры» определил выбор гистограммы с группировкой и двухуровневыми подписями оси категорий. Техническая реализация включила:

- настройку иерархической оси X (страна как надкатегория, города как подкатегории);
- цветовое кодирование по странам для усиления визуального разделения;
- добавление подписей данных для точного считывания значений.

	A	B	C	D	E
1	Страна	Город	Россия	Белоруссия	Казахстан
2	Россия	Москва	99		
3		Самара	39		
4		Питер	26		
5		Волгоград	23		
6		Воронеж	21		
7	Белоруссия	Гомель		41	
8		Минск		19	
9		Витебск		10	
10		Гродно		8	
11	Казахстан	Астана			87
12		Байконур			69
13		Павлодар			13

Рисунок 3 – Исходные данные продаж компании N

Аналитический результат: визуализация позволила мгновенно сопоставить не только межстрановые показатели, но и внутристрановую дисперсию. Выявлена высокая концентрация выручки в столичных городах (Москва – 99, Минск – 19, Астана – 87 тыс. руб.) и значительный разрыв между городами первой и второй линии. Данный инсайт, полученный за счёт визуального сжатия иерархии, недоступен при последовательном просмотре исходной таблицы, что вновь подтверждает эвристический потенциал модели.

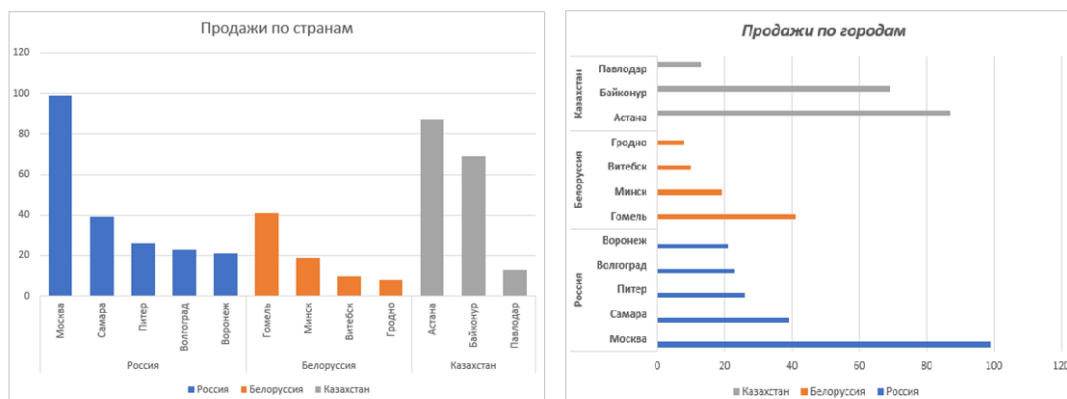


Рисунок 4 – Визуализация продаж компании N: сравнительный анализ по странам и городам

Аналитический результат: визуализация позволила мгновенно сопоставить не только межстрановые показатели, но и внутристрановую дисперсию. Выявлена высокая концентрация выручки в столичных городах (Москва – 99, Минск – 19, Астана – 87 тыс. руб.) и значительный разрыв между городами первой и второй линии. Данный инсайт, полученный за счёт визуального сжатия иерархии, недоступен при последовательном просмотре исходной таблицы, что вновь подтверждает эвристический потенциал модели.

Валидация по критериям качества $Q = \{q1, q2, q3, q4\}$:

- $q1$ (адекватность): каждый тип диаграммы строго соответствует аналитической задаче (сравнение → гистограмма, доля → круговая, иерархия → группированная гистограмма);
- $q2$ (точность): оси откалиброваны от нуля, масштаб пропорционален, этикетки верифицированы;
- $q3$ (когнитивная эффективность): ключевые инсайты воспринимаются непосредственно благодаря минимизации когнитивной нагрузки (принципы гештальт-психологии: близость, сходство, цветовое кодирование);
- $q4$ (воспроизводимость): алгоритм трансформации и выбора визуальной формы успешно применён к новому набору данных без модификации логики.

Оба кейса подтверждают, что предложенная системная модель обеспечивает сквозную логическую связь от неструктурированного текстового описания до интерпретируемого графического представления.

Целенаправленный выбор типа визуализации, основанный на аналитическом вопросе и структуре данных, определяет не эстетику, а глубину управленческого или научного вывода. Модель демонстрирует потенциал для применения в образовательных программах, бизнес-аналитике и научной коммуникации.

ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенная модель представляет собой формализованную систему обработки информации, соответствующую принципам системного анализа. В отличие от CRISP-DM (где визуализация ограничена EDA) или подходов С. Фью (ориентированных на дизайн), данная модель интегрирует трансформацию и визуализацию в единый управляемый цикл с обратной связью.

Ключевой вклад – введение критериев качества Q , которые трансформируют визуализацию из субъективной практики в объект системного управления. Критерий когнитивной эффективности ($q3$) напрямую связан с принципами предварительной обработки зрительной информации и законами гештальт-психологии [10], минимизируя когнитивную нагрузку при интерпретации данных. Критерий воспроизводимости ($q4$) обеспечивает научную строгость выводов.

Эмпирический кейс демонстрирует, что выбор типа диаграммы не является техническим решением, а определяет аналитическую перспективу: гистограмма фокусируется на субъектах (фермерах), круговая диаграмма – на объектах (видах овощей), линейный график – на отношениях между ними. Такой подход соответствует принципам системного анализа слабоструктурированных систем, где форма представления влияет на содержание интерпретации.

Практическая значимость модели подтверждается её применимостью в различных контекстах:

- в образовании – как методологический каркас для формирования цифровой грамотности;
- в бизнес-аналитике – для построения дашбордов с обоснованным выбором визуальных форм;
- в научной коммуникации – для повышения ясности и убедительности выводов.

Ограничения модели связаны с необходимостью ручной семантической разметки на первом этапе. Перспективы развития включают интеграцию методов обработки естественного языка (NLP) для автоматизации извлечения количественных утверждений из текста.

Показано, что визуализация выполняет не вспомогательную, а эвристически значимую функцию: изменение формы представления данных (от табличной к графической) способствует выявлению латентных паттернов и структурных асимметрий, неочевидных при исходном формате представления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана формализованная системная модель трансформации и визуализации неструктурированных данных S , обеспечивающая сквозную логическую связь от текстового описания до интерпретируемого графического представления, с критериями, позволяющими оценивать эффективность визуализации по параметрам адекватности, точности, когнитивной эффективности и воспроизводимости.

Результаты исследования могут быть применены: в образовательных программах (от начальной школы до окончания вуза), в бизнес-аналитике и управленческой отчётности, при разработке дашбордов и презентаций и в научной коммуникации для повышения ясности выводов [8].

Демонстрация модели на кейсе с сельскохозяйственными данными подтвердила её способность выявлять различные аспекты информации через целенаправленный выбор типа диаграммы, а также продемонстрировала генеративную функцию визуализации – порождение новых знаний, неочевидных при табличном представлении.

Предложенная модель может рассматриваться как методологический каркас для построения аналитических систем, ориентированных на принятие решений в условиях неструктурированных данных, и обеспечивает основу для формирования универсальных компетенций в области системного анализа и обработки информации.

Список источников

1. Структурированные и неструктурированные данные – в чем разница? – URL: <https://xn--80aigcbnbtbd5a5d.xn--p1ai/news/73/> (дата обращения: 03.11.2025).
2. Апанович, З. В. Методы визуализации информации – наукоёмкое направление современных ИТ / З. В. Апанович // Компьютерные инструменты в образовании. – 2010. – № 2. – С. 44–51.
3. Методология управления проектами CRISP-DM – URL: <https://courses.sberuniversity.ru/beginner-ai-literacy/3/4> (дата обращения: 11.11.2025).
4. Weber, R. Data Preprocessing and Intelligent Data Analysis / R. Weber // Fuzzy Sets and Systems. – 1997. – Vol. 90, № 1. – P. 149–153.
5. Brijith, A. Data Preprocessing for Machine Learning: Techniques and Best Practices / A. Brijith. – 2023. – 284 p.
6. Нафлик, Н. Данные: визуализируй, расскажи, используй. Сторителлинг в аналитике / Н. Нафлик. – URL: <https://www.litres.ru/book/koul-naflik/dannye-vizualiziruy-rasskazhi-ispolzuy-storitelling-v-analitik-51815782/> (дата обращения: 11.11.2025).
7. Фью, С. Дизайн информационной панели: эффективная визуализация данных / С. Фью. – URL: <https://dtf.ru/toprating/3266025-luchshie-knigi-po-vizualizacii-dannyh-top-10-reiting-2024> (дата обращения: 10.11.2025).
8. Саенко, М. А. Интегративный подход к структурному моделированию в информационном поле / М. А. Саенко // Образовательные ресурсы и технологии. – 2025. – № 1 (50). – С. 77–83. – DOI 10.21777/2500-2112-2025-1-77-83.
9. Волкова, В. Н. Основы теории систем и системного анализа: учебник / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГПУ, 2004. – 524 с.
10. Желязны, Д. Говори на языке диаграмм: пособие по визуальным коммуникациям / Д. Желязны. – 5-е изд. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2012. – 304 с.

References

1. *Structured and unstructured data: what is the difference?* Available at: <https://xn--80aigcbnbtbd5a5d.xn--p1ai/news/73/> (accessed 03.11.2025) (In Russ.).
2. Apanovich, Z. V. Information visualization methods: a knowledge-intensive field of modern IT. *Computer Tools in Education*, 2010, no. 2, pp. 44–51 (In Russ.).
3. CRISP-DM project management methodology. Available at: <https://courses.sberuniversity.ru/beginner-ai-literacy/3/4> (accessed 11.11.2025) (In Russ.).
4. Weber, R. Data Preprocessing and Intelligent Data Analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, vol. 90, no. 1, pp. 149–153.
5. Brijith, A. *Data Preprocessing for Machine Learning: Techniques and Best Practices*, 2023. 284 p.
6. Naflic, N. *Data: Visualize, Tell, Use. Storytelling in Analytics*. Available at: <https://www.litres.ru/book/koul-naflik/dannye-vizualiziruy-rasskazhi-ispolzuy-storitelling-v-analitik-51815782/> (accessed 11.11.2025) (In Russ.).
7. Few, S. *Dashboard Design: Effective Data Visualization*. Available at: <https://dtf.ru/toprating/3266025-luchshie-knigi-po-vizualizacii-dannyh-top-10-reiting-2024> (accessed 10.11.2025) (In Russ.).
8. Saenko, M. A. Integrative Approach to Structural Modeling in the Information Field. *Educational Resources and Technologies*, 2025, no. 1 (50), pp. 77–83. DOI 10.21777/2500-2112-2025-1-77-83 (In Russ.).
9. Volkova, V. N., Denisov, A. A. *Fundamentals of systems theory and systems analysis: textbook*. 3rd ed., rev. and exp. Saint Petersburg, SPbGPU Publishing House, 2004. 524 p. (In Russ.).
10. Zelazny, G. *Say It with Charts: A Guide to Visual Communication*. 5th ed. Moscow, Mann, Ivanov & Ferber, 2012. 304 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 22.04.2026; одобрена после рецензирования 14.05.2026; принята к публикации 21.05.2026.

The article was submitted 22.04.2026; approved after reviewing 14.05.2026; accepted for publication 21.05.2026.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

УДК 004.056

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.008

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ОБНОВЛЕНИЙ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Жуков Вадим Геннадьевич, Сибирский государственный университет науки и технологий, 660037, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-7933-6820, e-mail: zhukov@sibsau.ru

Алейников Павел Андреевич, Сибирский государственный университет науки и технологий, 660037, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, студент, ORCID: 0009-0005-4448-2026, e-mail: aleinikoffpavel@yandex.ru

Работа посвящена решению задачи противодействия атакам на цепочку поставок путём предварительного выполнения мер защиты информации, направленных на получение информации о безопасности получаемых обновлений прикладного программного обеспечения. Оценка безопасности обновлений является обязательной для выполнения процедурой в отношении иностранного и открытого программного обеспечения. В соответствии с требованиями отечественных методических документов по защите информации и рекомендациями лучших мировых практик определён состав и содержание мер защиты информации по оценке безопасности обновлений программного обеспечения. По результатам алгоритмизации мер защиты информации было разработано программное обеспечение, реализующее проверки по оценке безопасности обновлений и формирование итогового решения по разработанному алгоритму принятия решений. Результатом работы разработанного программного обеспечения является сводный отчёт, к которому прилагается детализированный протокол оценки, содержащий развёрнутые результаты по всем проведённым проверкам. Приведены демонстрационные результаты оценки разработанным программным обеспечением заведомо вредоносного и легитимного обновления. Разработанное программное обеспечение позволит сократить трудозатраты и снизить зависимость от квалификации специалиста, проводящего оценку безопасности. Данное утверждение подтверждено приведённым в работе результатом измерения трудозатрат на проведение оценки безопасности путём автоматизированного тестирования исследуемого обновления средствами разработанного ПО и ручного тестирования безопасности исследуемого обновления. Сформированный перечень мер и рекомендации по их реализации могут быть применены специалистами для разработки технического сценария оценки безопасности обновлений прикладного программного обеспечения в целевой ИТ инфраструктуре.

Ключевые слова: информационная безопасность, атака на цепочку поставок, прикладное программное обеспечение, обновления программного обеспечения, методика оценки безопасности

SECURITY ASSESSMENT OF APPLICATION SOFTWARE UPDATES IN THE TARGET INFORMATION SYSTEM

Zhukov G. Vadim, Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-7933-6820, e-mail: zhukov@sibsau.ru

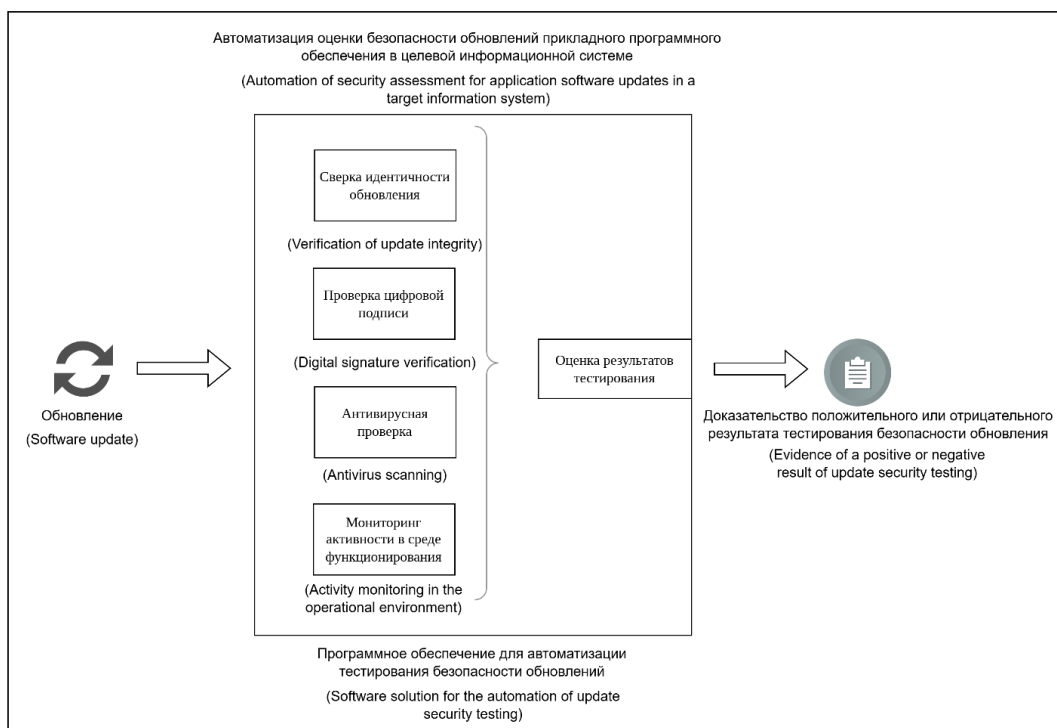
Aleinikov A. Pavel, Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation,

student, ORCID: 0009-0005-4448-2026, e-mail: aleinikoffpavel@yandex.ru

This work addresses the problem of countering supply chain attacks by implementing preliminary information security measures aimed at obtaining reliable data on the safety of incoming application software updates. Security assessment of updates is a mandatory procedure for foreign and open-source software. In accordance with national methodological information security guidelines and leading international best practices, the composition and content of security measures for assessing software update safety were defined. Based on the algorithmization of these measures, a software solution was developed to perform security checks on updates and to generate a final decision according to the designed decision-making algorithm. The result of the developed software is a consolidated report accompanied by a detailed assessment log containing comprehensive results of all performed checks. Demonstration tests using both known malicious and legitimate updates are provided. The developed solution reduces labor costs and minimizes dependence on the expertise of the specialist performing the assessment. This statement is confirmed by the result of measuring the labor costs of conducting a security assessment by automated testing of the investigated update using the developed software and manual testing of the security of the investigated update. The compiled list of measures and recommendations for their implementation can be used by professionals to create a technical procedure for software update security assessment within a target IT infrastructure.

Keywords: information security, supply chain attack, application software, software update, security enhancement

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

По данным аналитических отчётов Positive Technologies, Kaspersky, BI.ZONE, эксплуатация уязвимостей является одной из распространённых причин инцидентов информационной безопасности. Эффективность управления уязвимостями напрямую влияет на безопасность любой ИТ-инфраструктуры, особенно на её внешнем сетевом периметре. Выявление, анализ [1] и устранение уязвимостей программного, программно-аппаратного обеспечения информационных систем являются базовыми мерами в общемировой и отечественной практике защиты информации. Устранение уязвимостей программного обеспечения (ПО) возможно либо путём установки обновления, либо путём «виртуального патчинга», т. е. экранированием уязвимого ПО средствами защиты информации (ЗИ), которые препятствуют обнаружению и/или эксплуатации данных уязвимостей [2]. «Виртуальный патчинг» представляет собой временное решение и не устраняет саму причину, и, следовательно, единственным системным решением проблемы является обновление ПО в случае его фактического существования и доступности. Однако в результате атак на цепочки поставок (supply chain attack) [3, 4] злоумышленники могут получить доступ к конвейеру разработки, сетевым узлам и каналам распространения обновлений и осуществить подмену (модификацию) обновлений ещё до их доставки конечному пользователю в целевую ИТ-инфраструктуру [5–8], например, инциденты с SolarWinds, xz utils, eScan и Notepad++. И даже если крупный разработчик ПО организует защиту своего конвейера [9–11] разработки, всё равно остаются актуальными угрозы [12] безопасности, связанные с атаками на третью сторону (поставщики), код которой используют разработчики ПО. Данная логика актуальна как для коммерческого, так и для открытого ПО отечественного или иностранного производства.

Таким образом, и с точки зрения практической информационной безопасности, и с точки зрения требований и рекомендаций лучших практик [13, 14], нормативных правовых актов и методических документов необходимо выполнять предварительное тестирование обновлений ПО до их установки в целевой ИТ-инфраструктуре не только путём функционального тестирования [15], но и путём оценки их безопасности – обнаружения подмены, наличия вредоносной нагрузки и/или недеklarированных возможностей.

ПОРЯДОК И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТ ПО ТЕСТИРОВАНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ОБНОВЛЕНИЯ ПРИКЛАДНОГО ПО

Для оценки безопасности обновлений ПО в общемировой и отечественной практике ЗИ (например, методический документ ФСТЭК России «Методика тестирования обновлений безопасности программных, программно-аппаратных средств» от 28.10.2022) рекомендуется выполнение следующих мероприятий:

1) сверка идентичности обновлений – проводится путём расчёта контрольных сумм обновлений и их последующего сравнения с эталонными значениями, в случае если они известны, или между собой для одного и того же обновления, полученного из различных источников;

2) проверка подлинности обновлений – проводится в случае, если обновление подписано электронной подписью для проверки сертификата разработчика ПО и контроля целостности обновления;

3) антивирусная проверка обновлений – проводится путём исследования обновления средствами антивирусной защиты для подтверждения отсутствия в нём известных вредоносных компьютерных программ (вирусов);

4) мониторинг активности обновлений – проводится путём установки обновления в целевую среду функционирования и последующего анализа данных о взаимодействии компонентов обновленного ПО и о поведении в результате его взаимодействия со средой функционирования [16, 17].

В случае наличия доступа к коду, например, для открытого ПО, также возможен автоматизированный поиск опасных конструкций в коде обновления CWE-совместимым средством анализа кода, ML и/или ручной анализ обновлений [18–20].

Отметим, что в ряде случаев перечисленные мероприятия являются обязательными для выполнения, например, операторами информационных систем при принятии ими мер по устранению уязвимостей программных, программно-аппаратных средств информационных систем в соответствии с требованиями о ЗИ, содержащейся в государственных информационных системах, требованиями по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации.

СЦЕНАРИИ РЕАЛИЗАЦИИ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБНОВЛЕНИЙ ПРИКЛАДНОГО ПО В ЦЕЛЕВОЙ ИТ ИНФРАСТРУКТУРЕ

На практике оценка безопасности может проводиться путём тестирования:

1) силами и средствами специализированных организаций, имеющих высокий уровень экспертизы в области ЗИ, с последующей публикацией результатов тестирования на общедоступном ресурсе, например, в разделе «Тестирование обновлений» на сайте БДУ ФСТЭК России. Результаты тестирования также могут распространяться по платной подписке в рамках предоставления услуг безопасности по сервисной модели;

2) самостоятельно силами и средствами специалистов на местах. Для реализации вышеописанных мероприятий по тестированию безопасности обновлений на местах можно прибегнуть к применению различных штатных средств операционных систем и сторонних специализированных инструментов, включая средства ЗИ;

3) некоторая часть работ по тестированию осуществляется силами и средствами специализированных организаций, а остальное – самостоятельно.

Рассмотрим более подробно основные мероприятия по тестированию, направленные на оценку безопасности обновлений ПО:

1. Сверку идентичности обновления можно выполнить штатными средствами операционной системы, например, в Microsoft Windows 10/11 или Microsoft Windows Server можно использовать командлет Get-FileHash в PowerShell или утилиту certutil. Результатом выполнения будет являться контрольная сумма файла обновления ПО, вычисленная по алгоритму SHA256 (по умолчанию). Также могут быть использованы и другие алгоритмы MD5, SHA1, SHA384, SHA512. В Linux контрольную сумму файла обновления ПО можно вычислить с помощью cksum, md5sum, shasum, sha256sum или gostsum. В качестве стороннего ПО для выполнения сверки идентичности можно использовать, например, 7ZIP. После вычисления значения контрольной суммы файла обновления ПО специалисту необходимо вручную или автоматизированно сравнить его с эталонным значением. Для автоматизации проверки можно воспользоваться не только локальными средствами, но и облачными сервисами, например, CyberChef.

2. Обновление ПО может быть подписано электронной подписью. Проверить электронную подпись можно как в операционных системах Microsoft Windows (например, с помощью штатного функционала проводника на вкладке «Цифровые подписи» в свойствах файла), так и в операционных системах на базе ядра Linux (например, воспользовавшись утилитой GNU Privacy Guard). В результате изучения данных электронной подписи специалист может сделать вывод о её наличии и действительности.

3. Антивирусная проверка файла обновления ПО может быть выполнена как через общедоступные облачные сервисы (VirusTotal, Kaspersky Threat Intelligence Portal, MetaDefenderCloud), так и с помощью штатного (используемого в организации) средства антивирусной защиты (СAB3), например, Kaspersky Endpoint Security или Dr. Web Enterprise Security Suite. Необходимо отметить, что вердикты CAB3 могут быть неоднозначны, так, например, приставка «HEUR» в вердикте Kaspersky Endpoint Security говорит об эвристическом анализе, который может выносить ложнополо-

ложительные результаты. По результатам антивирусной проверки специалисту необходимо принять решение о наличии или отсутствии вредоносных компьютерных программ (вирусов) в исследуемом файле обновления, опираясь на вердикт/вердикты САВЗ.

4. Мониторинг активности обновлений всегда осуществляется в целевой среде функционирования – как правило, это заранее подготовленный изолированный исследовательский стенд на базе технологий виртуализации или паравиртуализации, по составу и содержанию соответствующий реальному окружению обновляемого ПО. Специалисту, который выполняет тестирование, необходимо загрузить исполняемый файл обновления и установить его в предварительно настроенную (например, с помощью PT Sandbox) изолированную среду функционирования, запустить анализ, после чего ознакомиться с результатом анализа и принять решение о наличии или отсутствии вредоносной нагрузки, и/или недекларированных возможностей в исследуемом обновлении. В случае отсутствия в организации технических возможностей для локального развёртывания изолированной среды функционирования специалист может воспользоваться облачными сервисами, предоставляющими возможность поведенческого анализа (например, AnyRun), конечно, при условии, что требования политики безопасности напрямую не запрещают такой вариант реализации проведения мониторинга активности обновлений ПО. На следующем этапе развития мониторинга активности целесообразно рассмотреть вариант реализации среды функционирования на базе тестового сегмента информационной системы – посегментный «канареечный» сценарий развёртывания обновлений ПО.

К применяемым для тестирования средствам могут предъявляться требования обязательной сертификации по требованиям безопасности [21] и уровням доверия ФСТЭК России и/или ФСБ России.

Антивирусная проверка и мониторинг активности могут на выходе формировать неоднозначные или противоречивые вердикты со стороны применяемых решений. В таком случае специалисту необходимо проанализировать результаты и сделать вывод о безопасности исследуемого обновления, опираясь на свои профессиональные компетенции.

В любом случае после проведения всех мероприятий специалисту необходимо проанализировать их результаты и принять взвешенное решение с учётом возможных рисков безопасности, связанных с оценкой последствий от установки обновления или, наоборот, отказа от его установки в конкретных сегментах ИТ-инфраструктуры и в информационной системе организации в целом. В некоторых случаях специалистом осуществляется эскалация на следующий уровень принятия решений для утверждения руководителем направления. По результатам тестирования должны быть сформированы и сохранены цифровые доказательства с полученными результатами тестирования и принятыми решениями. В некоторых случаях требуются согласования с обслуживающими отделами и владельцами активов, на которых будет устанавливаться обновление.

Таким образом, весь процесс «ручного» тестирования обновления и его результаты зависят от квалификации специалиста, требуют время и вычислительных мощностей. И если повлиять на требуемые для исследования вычислительные мощности в большинстве случаев нет возможности, то сократить время тестирования и снизить субъективность возможно путём регламентации и автоматизации данного процесса по заранее определённым сценарию с утверждёнными требованиями к составу и содержанию проверок, инструментам, полученным результатам.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБНОВЛЕНИЙ ПРИКЛАДНОГО ПО

Для успешной автоматизации тестирования обновлений прикладного ПО необходимо формализовать решаемые задачи и определить функциональные требования к разрабатываемому ПО.

Разрабатываемое ПО предназначено для автоматизации оценки безопасности обновлений прикладного ПО, функционирующего под управлением операционных систем Microsoft Windows 10/11 64-bit. Выбор целевой операционной системы обусловлен:

- 1) прекращением поддержки Microsoft Windows 10 со стороны производителя;
- 2) даже с учётом повсеместного перехода на отечественное ПО в рамках импортозамещения, доля сетевых узлов под управлением операционных систем Microsoft Windows остаётся всё ещё велика;

Основная цель разработки – предоставить доступную, более эффективную (в вопросах затрачиваемого на тестирование времени), а также менее требовательную к квалификации лица, ответственного за процесс тестирования, альтернативу ручному тестированию безопасности обновлений.

Для достижения поставленной цели перед разрабатываемым ПО были поставлены следующие задачи:

- 1) обнаружение атак на цепочку поставок путём тестирования безопасности обновлений прикладного ПО до их развёртывания в целевой ИТ-инфраструктуре и, таким образом, препятствование её компрометации;
- 2) снижение времени, затрачиваемого на тестирование безопасности обновлений специалистом по информационной безопасности. От специалиста требуется лишь тривиальная работа с графическим интерфейсом разрабатываемого ПО;

3) обеспечение независимости проверок: каждый проверочный модуль разрабатываемого ПО должен выполнять свою функциональную нагрузку независимо от остальных, что позволит выборочно выполнять отдельные проверки и формировать конкретные стратегии тестирования по запросу;

4) формирование итогового вердикта о безопасности исследуемого обновления по заранее известному алгоритму: результатом работы разрабатываемого ПО должно быть автоматическое формирование вердикта, основанного на результатах проверок, включённых в план тестирования, что позволит вынести однозначное верифицируемое решение о безопасности исследуемого обновления;

5) генерация итогового отчёта о тестировании и его результатах, пригодного для внедрения в документооборот организации.

Для решения поставленных задач были определены функциональные требования к разрабатываемому ПО:

1) в рамках сверки идентичности обновлений должен поддерживаться функционал вычисления значений контрольных сумм по алгоритмам MD5, SHA1, SHA256, SHA512 и их сверки с эталонными значениями в случае их существования/доступности;

2) в рамках проверки подлинности обновлений должен поддерживаться функционал проверки электронной подписи на предмет её наличия, достоверности и действительности;

3) в рамках антивирусной проверки должен поддерживаться функционал проверки обновления САВЗ, взаимодействие с которыми реализовано через API;

4) в рамках мониторинга активности должен поддерживаться функционал динамического анализа предположительно вредоносного обновления внутри изолированной среды функционирования (в песочнице), взаимодействие с которой реализовано через API. Результатом работы должен являться следующий набор данных: порождённые исследуемым обновлением и обновляемым ПО процессы, созданные файлы, установленные сетевые соединения, обнаруженные тактики и техники в соответствии с MITRE ATT&CK и их описание, уровень угрозы, определённый песочницей;

5) все выполняемые специалистом действия и результаты всех проведённых проверок должны записываться в журнал регистрации событий;

6) формирование отчёта о тестировании безопасности обновления в формате PDF с вердиктом работы программы и сопутствующими данными, которые позволят идентифицировать конкретное тестирование;

7) обработка различных типов входных данных. Функционал разрабатываемого ПО должен позволять выполнять полный цикл тестирования для следующих типов входных файлов: *.exe, *.msi. Для *.ps1, *.bat, *.zip – частичное тестирование (антивирусный контроль обновлений и мониторинг активности обновлений в среде тестирования).

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В рамках проектирования было принято решение реализовать модульную архитектуру с параллельной (независимой) логикой обработки. Результаты проверок агрегируются в центральном модуле формирования вердикта, который на их основе генерирует итоговое решение о безопасности обновления по установленному алгоритму.

Основными функциональными модулями ПО являются (рис. 1):

- 1) модуль сверки идентичности обновлений;
- 2) модуль проверки электронной подписи;
- 3) модуль антивирусной проверки;
- 4) модуль мониторинга активности в среде функционирования;
- 5) модуль формирования вердикта.

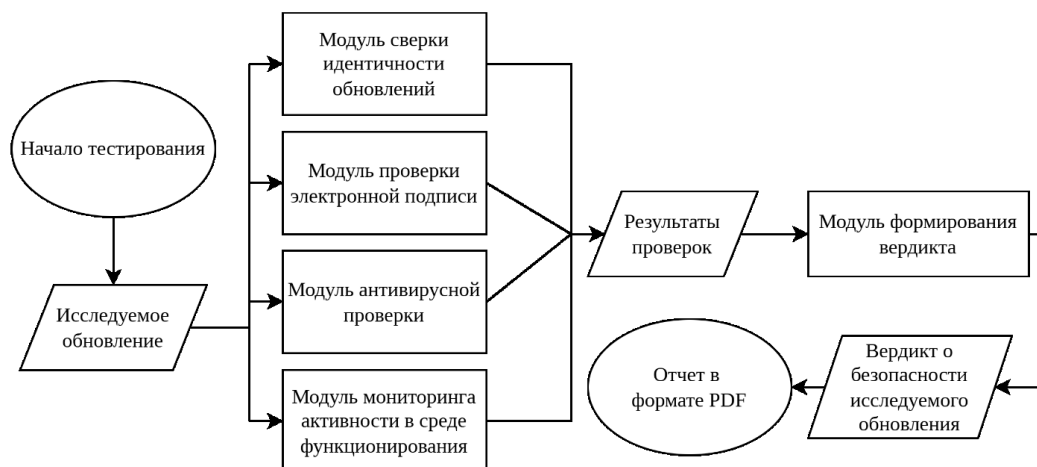


Рисунок 1 – Обобщенная схема ПО

Полный план тестирования сводится к обработке исследуемого обновления путём проведения серии проверок, каждая из которых выполняется отдельным функциональным модулем. После прохождения всех проверок формируется вердикт о безопасности обновления, а также подробный отчёт с доказательствами положительного или отрицательного результата тестирования безопасности исследуемого обновления.

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБНОВЛЕНИЙ

В соответствии со схемой, представленной на рисунке 1, было разработано ПО для автоматизации тестирования безопасности обновлений прикладного ПО.

В качестве входных данных разработанное для тестирования безопасности ПО получает путь к исследуемому обновлению и эталонные контрольные суммы в случае их наличия. Для сверки идентичности необходимо выбрать алгоритмы (по умолчанию SHA256) и запустить вычисление контрольной суммы. Вычисление контрольной суммы реализовано путём чтения исследуемого файла в бинарном режиме и расчёта хеш-суммы с использованием модуля hashlib в Python, который предоставляет набор функций для работы с криптографическими хеш-функциями. В зависимости от результата сравнения вычисленного значения контрольной суммы с эталонными значениями подтверждается или опровергается идентичность исследуемого обновления.

Проверка подлинности обновлений реализована путём выполнения командлета Get-AuthenticodeSignature командного интерпретатора PowerShell с указанием в качестве входного параметра абсолютного пути к исследуемому файлу обновления и последующим отбором на выходе только значения поля Status – Valid, NotSigned, HashMismatch, UnknownError, NotTrusted. Результатом проверки является подтверждение или опровержение наличия и действительности цифровой подписи исследуемого обновления.

Антивирусная проверка реализована средствами общедоступного облачного сервиса VirusTotal при помощи использования механизма API вызовов, который предоставляет облачная платформа для авторизованных пользователей. На вход модуль антивирусной проверки получает файл исследуемого обновления и загружает его на VirusTotal, получает от сервиса результаты проверки в формате json, проводит их обработку и выводит итоговый результат антивирусной проверки в графический интерфейс ПО как набор вердиктов от разных разработчиков САВЗ, которые подтверждают или опровергают вредоносность исследуемого обновления. На рисунке 2 приведена схема, которая отражает алгоритм проверки обновления средствами САВЗ.

Мониторинг активности обновления реализован средствами общедоступного облачного сервиса Hybrid Analysis при помощи использования механизма API вызовов, который предоставляет облачная платформа для авторизованных пользователей. На вход модуль мониторинга активности получает файл исследуемого обновления и отправляет его на Hybrid Analysis. На рисунке 3 отображен алгоритм работы модуля мониторинга активности в среде функционирования.

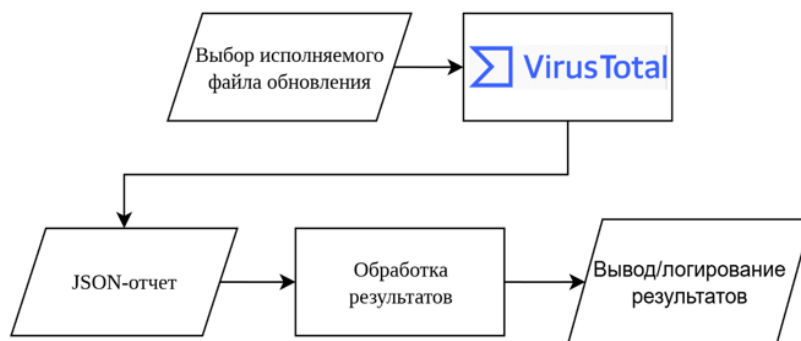


Рисунок 2 – Алгоритм проверки обновления средствами SAV3

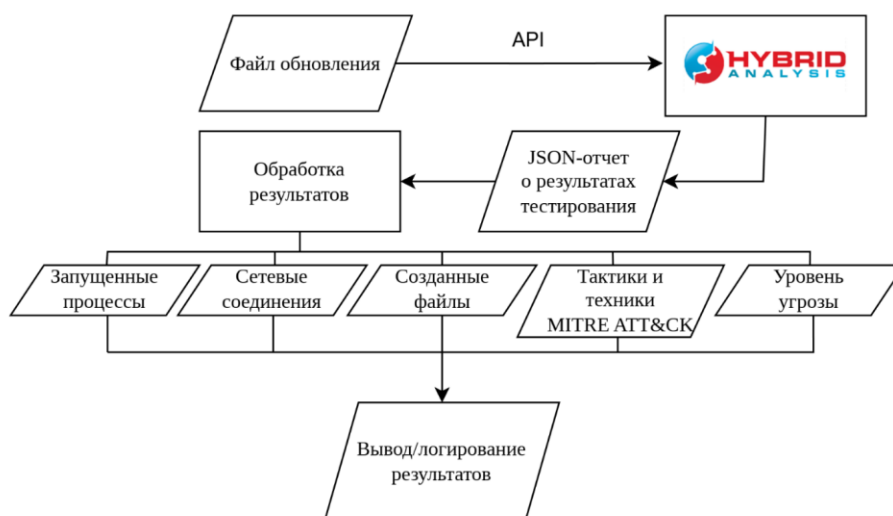


Рисунок 3 – Алгоритм работы модуля мониторинга активности в среде функционирования

Результатом работы модуля является следующий набор данных: порождённые исследуемым обновлением процессы, созданные подозрительные файлы, установленные сетевые соединения, использованные тактики и техники в соответствии с MITRE ATT&CK и их описания, уровень угрозы, определённый песочницей.

Необходимо отметить, что в связи с выбранными решениями для реализации функционала антивирусного контроля (VirusTotal) и мониторинга активности (Hybrid Analysis), накладываются ограничения на максимальный размер файла обновления, в соответствии с условиями бесплатного использования API указанных сервисов.

Модуль формирования вердикта, получив результаты от модулей сверки идентичности обновлений, проверки электронной подписи, антивирусной проверки и мониторинга активности в среде функционирования и в соответствии с логикой, представленной на рисунке 4, выносит итоговый вердикт о безопасности исследуемого обновления.

Логика вынесения вердикта может и должна быть адаптирована под нужды конкретной организации путём настройки значений таких параметров, как процент SAV3, которые обнаружили вредоносную нагрузку и уровень угрозы.

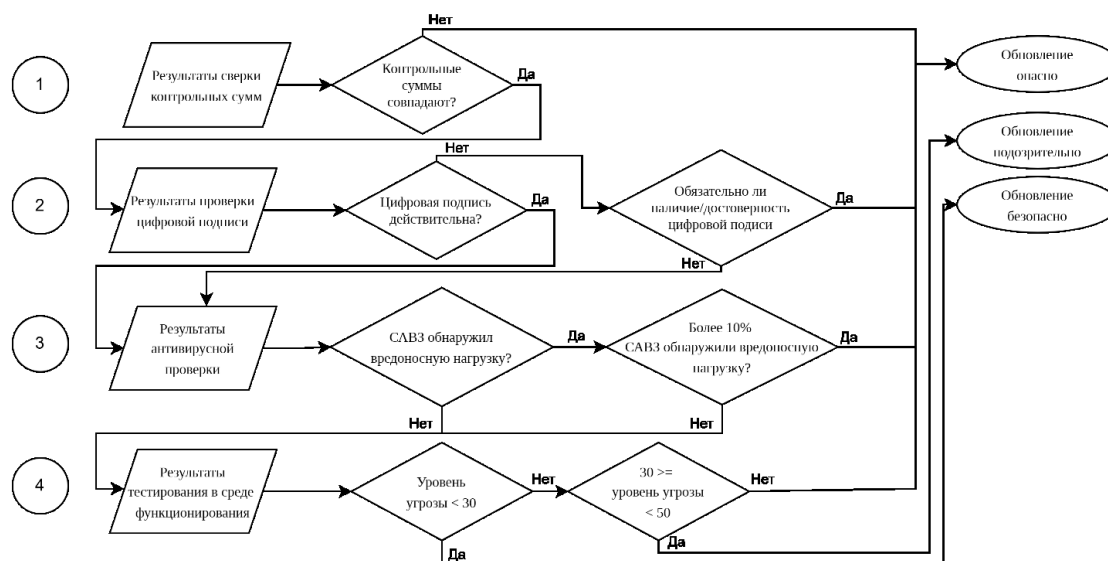


Рисунок 4 – Алгоритм вынесения вердикта о безопасности исследуемого обновления

Результатом работы разработанного ПО является формирование итогового PDF-отчёта, который является доказательством положительного или отрицательного результата тестирования безопасности обновления и может быть интегрирован в документооборот организации.

ОПИСАНИЕ SBOM

Для обеспечения прозрачности цепочки поставок был сформирован SBOM (перечень библиотек, конкретных файлов и зависимостей, имеющих отношение к разрабатываемому программному обеспечению) в формате CycloneDX 1.6. SBOM строился на основе активного виртуального окружения, что позволило получить полный список реально используемых библиотек.

Ниже перечислены некоторые ключевые компоненты SBOM:

1) для обеспечения сетевого взаимодействия используются следующие зависимости: requests, urllib3, idna, charset-normalizer и certifi. Данные библиотеки обеспечивают работу HTTP-клиента, необходимого для интеграции с внешними сервисами анализа вредоносных файлов;

2) для регистрации событий используются следующие зависимости: PyYAML, simplejson и python-json-logger;

3) для определения типа анализируемого файла используется пакет python-magic-bin;

4) для обработки временных меток используются пакеты python-dateutil и pytz, в части интерпретации значений временных данных из отчётов VirusTotal и Hybrid Analysis;

5) дополнительно используются следующие зависимости: pydantic, pydantic_core, jsonschema, jsonschema-specifications, datefinder, arrow, stix2, boolean.py, pyparsing, tkbootstrap, pillow, setuptools и др.

Полный SBOM в формате json распространяется вместе с исполняемым файлом разработанного ПО для возможности автоматического анализа уязвимостей и проверки соответствия требованиям безопасности.

ДЕМОНСТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБНОВЛЕНИЙ ПРИКЛАДНОГО ПО

В рамках демонстрации автоматизации было принято решение провести тестирование легитимного обновления ПО, используемого для удалённого доступа PuTTY, а также заведомо вредоносного сгенерированного импланта C2 сервера Sliver (наименование программы – ELECTRIC_TRADE.exe). В рамках тестирования было принято решение считать, что легитимное обновление было подменено на заведомо вредоносный имплант C2 сервера в процессе разработки или сборки обновления разработчиком ПО, т. е. обновление подписано действительной электронной подписью. Данная пара обновлений ПО была выбрана для демонстрации явного контраста между результатами тестирования безопасного обновления и заведомо вредоносного.

Для выполнения демонстрации результатов тестирования безопасности обновлений прикладного ПО была выполнена подготовка к проведению тестирования:

1. Загружены выбранные обновления ПО (PuTTY загружен с официального сайта, а ELECTRIC_TRADE.exe был загружен с предварительно настроенного тестового стенда).

2. Запущен исполняемый файл разработанного ПО для тестирования безопасности обновлений прикладного ПО.

Выполним сверку идентичности исследуемых обновлений, для этого:

- 1) на первой вкладке (Сверка контрольных сумм) укажем путь к исследуемому обновлению;
- 2) введём эталонное значение контрольной суммы SHA256 в соответствующее поле;
- 3) запустим проверку, нажав кнопку «Проверить указанные контрольные суммы».

Результаты сверки идентичности представлены на рисунке 5.

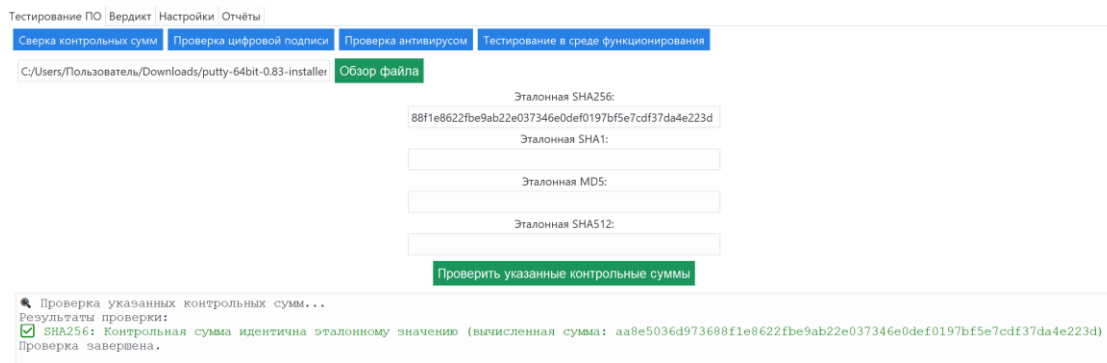


Рисунок 5 – Результат сверки идентичности обновления ПО PuTTY

Выполним проверку цифровой подписи: ПО вернуло сообщение о том, что цифровая подпись действительна для обоих исследуемых обновлений (рисунок 6).

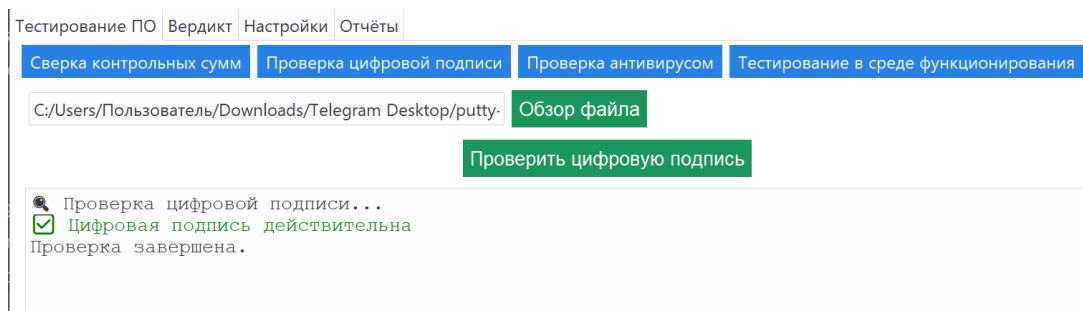
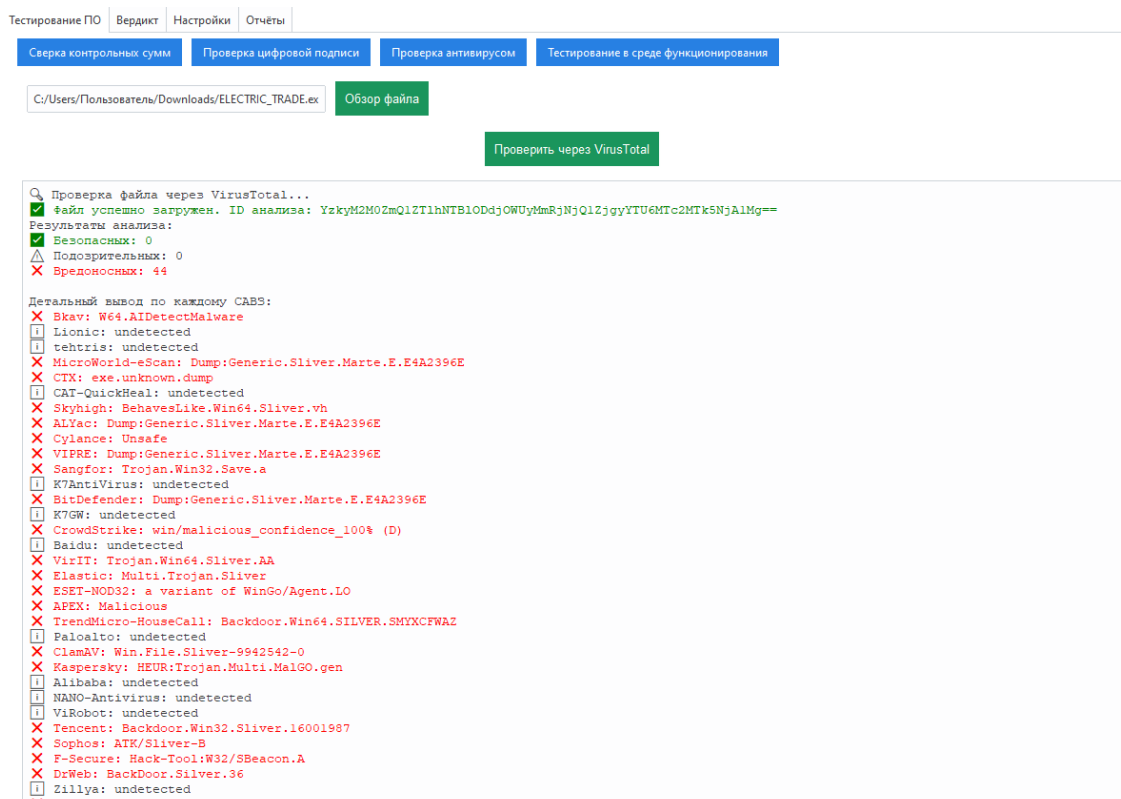
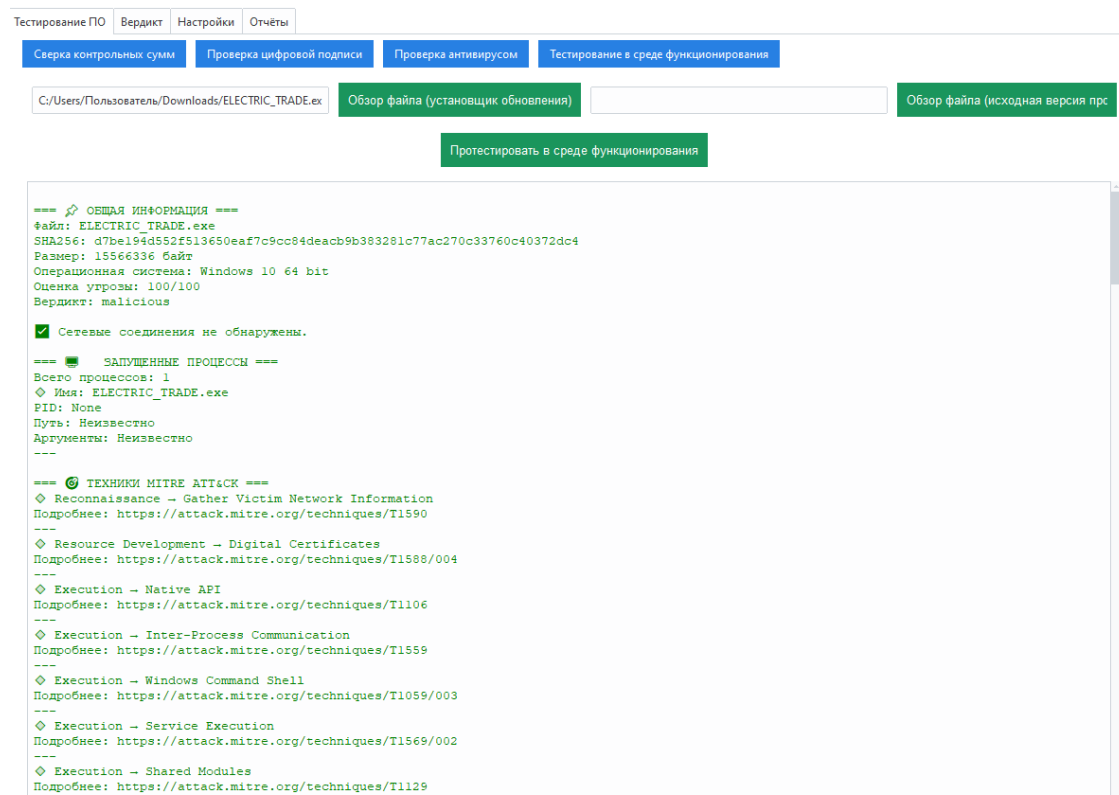


Рисунок 6 – Результат проверки цифровой подписи ПО PuTTY

Выполним проверку средствами антивирусной защиты через VirusTotal. Программа вернула в консоль сообщение о том, что файл был успешно загружен на VirusTotal и значение ID-анализа. После проверки в консоль был выведен список CAB3 и их вердикты для исследуемого файла обновления. Аналогичная процедура была проведена для файла обновления ELECTRIC_TRADE.exe. В результате проведённой проверки, 44 CAB3 посчитали обновление ELECTRIC_TRADE.exe вредоносным, причём вердикты некоторых CAB3 содержат информацию о том, что обновление несёт в себе угрозу, связанную с Sliver C2 (рис. 7).

Таким образом, уже на третьем шаге тестирования удалось выявить вредоносное обновление, а также определить конкретную угрозу, инжектированную в обновление.

Проведём мониторинг активности исследуемых обновлений в среде функционирования (ОС Windows 10 64-bit). По результатам проверки программа вернула в консоль диагностическое сообщение о том, что анализ был начат и спустя приблизительно 180 секунд в консоль была выведена информация о результатах мониторинга исследуемого обновления в изолированной среде. HybridAnalysis присвоил исследуемому обновлению ELECTRIC_TRADE.exe уровень угрозы 100/100, что говорит о том, что обновление представляет опасность. Средство статического и динамического анализа выявило запущенные многочисленные техники, которые исполняет обновление в соответствии с базой знаний MITRE ATT&CK, в их числе T1590 (Gather Victim Network Information), T1059.003 (Windows Command Shell) и др. (рис. 8).

Рисунок 7 – Результат антивирусной проверки файла *ELECTRIC_TRADE.exe*Рисунок 8 – Результат мониторинг активности *ELECTRIC_TRADE.exe*

Результат четвёртого шага тестирования подтвердил наличие вредоносной нагрузки в исследуемом обновлении. Файл обновления PuTTY, в свою очередь, получил уровень угрозы 0/100.

После проведения всех проверок средствами разработанного ПО, в соответствии с логикой, отображенной на рисунке 2, были вынесены вердикты о безопасности развёртывания исследуемых обновлений – обновление PuTTY было признано безопасным, а обновление ELECTRIC_TRADE.exe, напротив, было признано опасным.

На рисунке 9 представлен титульный лист итогового отчёта тестирования безопасности обновления ELECTRIC_TRADE.exe в формате PDF.

ООО ИНФОРМБЕЗОПАСНОСТЬ'
Отдел анализа обновлений
ИНН 1234567890 | г. Красноярск | www.iblab.ru

ОТЧЁТ

о результатах тестирования безопасности обновления программного обеспечения
№ 123 от 26.10.2025

****Тестируемая ОС****

Наименование: Windows 10 Pro
Версия 22H2
Архитектура: x64

****Объект проверки:****

Наименование:	ELECTRIC_TRADE.exe
Версия:	1.23.2
Сумма SHA-256:	d7be194d552f513650eaf7c9cc84deacb9b383281c77ac270c33760c40372dc4
Размер:	15 566 336 байт
Дата анализа:	26.10.2025

****Результаты тестирования:****

Наименование теста	Результат
Сверка идентичности	Обновление идентично
Проверка подлинности	Обновление подлинно
Антивирусный контроль	Выявлены признаки вредоносной активности (44 обнаружения)
Мониторинг активности обновлений в среде функционирования	Выявлены признаки недеklarированных возможностей или деструктивного функционала. Уровень угрозы 100/100

Вердикт: в ходе тестирования обновления **выявлены** недеklarированные возможности

Рекомендуемые действия:

Обновление не рекомендуется к установке

Сформировано автоматически
Тестирование выполнил Арбузов Владислав Иванович
Система анализа обновлений v1.2.3 — ИБ-лаборатория 2025

Рисунок 9 – Итоговый отчёт тестирования безопасности ELECTRIC_TRADE.exe

Таким образом, была успешно проведена демонстрация процесса автоматизированного тестирования для оценки безопасности обновлений прикладного ПО средствами разработанного ПО.

Проведём оценку трудозатрат на проведение оценки безопасности путём автоматизированного тестирования обновления ELECTRIC_TRADE.exe средствами разработанного ПО и ручного тестирования. В качестве критерия для оценки трудозатрат было выбрано время, затраченное на проведение оценки безопасности. Результаты оценки приведены в таблице.

Таблица – Сравнительный анализ затрачиваемого времени на проведение оценки безопасности обновления прикладного ПО ELECTRIC TRADE.exe

Наименование выполняемых работ	Время тестирования средствами разработанного ПО, с	Ручное тестирование, с
Сверка идентичности	~ 1–10	> 60
Проверка подлинности	~ 1–10	> 60
Антивирусный контроль (анализ + интерпретация результатов)	~ 10–60	> 300
Мониторинг активности в среде функционирования (анализ + интерпретация результатов)	~ 100–300	> 3600
Вынесения вердикта о безопасности исследуемого обновления	~ 1–10	> 600
Формирование отчёта	~ 1–10	> 3600
Итого	~ 400	> 8220

В результате проведённого сравнительного анализа можно сделать вывод о том, что автоматизация процесса оценки безопасности обновления прикладного ПО средствами разработанного ПО значительно снижает трудозатраты (чел/час), особенно в части интерпретации результатов и формирования отчёта по результатам оценки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы был разработан и программно реализован автоматизированный сценарий оценки безопасности обновлений прикладного ПО. Применение разработанного ПО позволит:

- 1) снизить требования к компетенциям специалиста, ответственного за процесс оценки безопасности;
- 2) снизить затрачиваемое на оценку безопасности время;
- 3) гарантировать верифицируемость получаемых результатов;
- 4) сформировать и сохранить все промежуточные и итоговые цифровые доказательства (свидетельства) оценки безопасности конкретного обновления прикладного ПО.

Результаты работы разработанного ПО позволят получить оценку безопасности обновлений до их установки в целевой ИТ-инфраструктуре, тем самым снизить риски её компрометации через реализацию атаки на цепочки поставок.

Список источников

1. Жуков, В. Г. Автоматизация оценки уязвимостей программных, программно-аппаратных средств в целевой информационной системе / В. Г. Жуков, С. В. Селигеев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – № 4 (64). – С. 16–25. – DOI 10.54398/20741707_2023_4_16. – EDN SRMLBD.
2. Duan, X. S. Research and application of server security protection based on virtual patch / X. Duan, S. Liu and L. Gu // 2020 International Conference on Information Science, Parallel and Distributed Systems (ISPDS). – Xi'an, China, 2020. – P. 52–55. – DOI 10.1109/ISPDS51347.2020.00018.
3. Ladisa, P. Taxonomy of attacks on open-source software supply chains / P. Ladisa, H. Plate, M. Martinez, O. Barais // 2023 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). – 2023. – P. 1509–1526.
4. Enck, W. Top Five Challenges in Software Supply Chain Security: Observations From 30 Industry and Government Organizations / W. Enck, L. Williams // IEEE Security and Privacy. – 2022. – Vol. 20, № 2. – P. 96–100. – DOI 10.1109/msec.2022.3142338. – EDN LVNDFA.
5. Supply chain attack puts thousands of firms at risk // Network Security. – 2021. – Vol. 2021, № 5. – P. 1–2. – DOI 10.1016/s1353-4858(21)00044-1. – EDN LBBFUZ.
6. Cox, R. Fifty Years of Open Source Software Supply Chain Security / R. Cox // Queue. – 2025. – Vol. 23, № 1. – P. 84–107. – DOI 10.1145/3722542. – EDN KUWSPG.
7. Alkhadra, R. Solar winds hack: In-depth analysis and countermeasures / R. Alkhadra, J. Abuzaid, M. AlShammari, N. Mohammad // 2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). – 2021. – P. 1–7.
8. Zahan, N. What are weak links in the npm supply chain? / N. Zahan, T. Zimmermann, P. Godefroid, B. Murphy, C. Maddila, L. Williams // 2022 IEEE/ACM 44th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP). – 2022. – P. 331–340.
9. Williams, L. Narrowing the software supply chain attack vectors: the SSDF is wonderful but not enough / L. Williams // IEEE Security and Privacy. – 2024. – Vol. 22, № 2. – P. 4–7. – DOI 10.1109/msec.2024.3359798. – EDN WAYAMD.

10. Barabanov, A. On Systematics of the Information Security of Software Supply Chains / A. Barabanov, A. Markov, V. Tsirllov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – Vol. 1294. – P. 115–129. – DOI 10.1007/978-3-030-63322-6_9. – EDN XBAAJE.
11. Research Directions in Software Supply Chain Security / L. Williams, G. Benedetti, S. Hamer [et al.] // *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. – 2025. – DOI 10.1145/3714464. – EDN GJABOU.
12. Куликов, С. С. Анализ угроз информационной безопасности, связанных с атаками на цепи поставок / С. С. Куликов, В. И. Белоножкин, Н. А. Ююкин // *Информация и безопасность*. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 135–140. – DOI 10.36622/VSTU.2022.25.1.011. – EDN GURLHF.
13. ENISA Good practices for supply chain cybersecurity. – June, 2023. – URL: <https://www.enisa.europa.eu/publications/good-practices-for-supply-chain-cybersecurity> (дата обращения: 29.09.2025).
14. CISA securing the software supply chain recommended practices guide for developers. – August, 2022. – URL: <https://www.cisa.gov/resources-tools/resources/securing-software-supply-chain-recommended-practices-developers> (дата обращения: 29.09.2025).
15. Семенков, К. В. Методика оценки необходимости применения обновлений безопасности в промышленных системах / К. В. Семенков, В. Г. Промыслов // *Проблемы управления*. – 2025. – № 2. – С. 58–73. – EDN YVANRD.
16. Shin, H. Ch. Supply chain attack detection technology using ELK stack and Sysmon / H. Ch. Shin, M. Ho. Oh, S. Ju. Gong, J. M. Kim // *Journal of Information and Security*. – 2022. – Vol. 22, № 3. – P. 13–18. – DOI 10.33778/kcsa.2020.20.3.013. – EDN XDEGOE.
17. Haider, R. Z. C2-Eye: framework for detecting command and control (C2) connection of supply chain attacks / R. Z. Haider, B. Aslam, H. Abbas, Z. Iqbal // *International Journal of Information Security*. – 2024. – DOI 10.1007/s10207-024-00850-y. – EDN CTRLZL.
18. Сердечный, А. Л. Технология выявления сведений об уязвимостях сторонних компонентов программного обеспечения с открытым исходным кодом / Сердечный А. Л., Герасимов И. В., Макаров О. Ю., Ю. Г. Пастернак, Н. М. Тихомиров // *Информация и безопасность*. – 2020. – Т. 23, № 3 (4). – С. 347–364.
19. Барабанов, А. В. Актуальные вопросы выявления уязвимостей и недеklarированных возможностей в программном обеспечении / А. В. Барабанов, А. С. Марков, В. Л. Цирлов // *Системы высокой доступности*. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 12–17. – DOI 10.18127/j20729472-201803-03. – EDN VKADRP.
20. Марков, А. С. Аудит программного кода по требованиям безопасности / А. С. Марков, В. Л. Цирлов // *Information Security*. – 2008. – № 2. – С. 56–57. – EDN YJDPFN.
21. Вареница, В. В. Практические аспекты выявления уязвимостей при проведении сертификационных испытаний программных средств защиты информации / В. В. Вареница, А. С. Марков, В. В. Савченко, В. Л. Цирлов // *Вопросы кибербезопасности*. – 2021. – № 5 (45). – С. 36–44. – DOI 10.21681/2311-3456-2021-5-36-44. – EDN TBQOCG.

References

1. Zhukov, V. G., Seligeev, S. V. Automation of vulnerability assessment of software, hardware and software in the target information system. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2023, no. 4 (64), pp. 16–25. DOI 10.54398/20741707_2023_4_16. EDN SRMLBD (In Russ.).
2. Duan, X., Liu, S. and Gu, L. Research and application of server security protection based on virtual patch. *2020 International Conference on Information Science, Parallel and Distributed Systems (ISPDS)*. Xi'an, China, 2020, pp. 52–55. DOI: 10.1109/ISPDS51347.2020.00018.
3. Ladisa, P., Plate, H., Martinez, M., Barais, O. Taxonomy of attacks on open-source software supply chains. *2023 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 2023, pp. 1509–1526.
4. Enck, W., Williams, L. Top Five Challenges in Software Supply Chain Security: Observations From 30 Industry and Government Organizations. *IEEE Security and Privacy*, 2022, vol. 20, no. 2, pp. 96–100. DOI 10.1109/msec.2022.3142338. EDN LVNDFA.
5. Supply chain attack puts thousands of firms at risk. *Network Security*, 2021, vol. 2021, no. 5, pp. 1–2. DOI 10.1016/s1353-4858(21)00044-1. EDN LBBFUZ.
6. Cox, R. Fifty Years of Open Source Software Supply Chain Security. *Queue*, 2025, vol. 23, no. 1, pp. 84–107. DOI 10.1145/3722542. EDN KUWSPG.
7. Alkhadra, R., Abuzaid, J., AlShammari, M., Mohammad, N.: Solar winds hack: In-depth analysis and countermeasures. *2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2021, pp. 1–7.
8. Zahan, N., Zimmermann, T., Godefroid, P., Murphy, B., Maddila, C., Williams, L. What are weak links in the npm supply chain? *2022 IEEE/ACM 44th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP)*, 2022, pp. 331–340.
9. Williams, L. Narrowing the Software Supply Chain Attack Vectors: The SSDF Is Wonderful but not Enough. *IEEE Security and Privacy*, 2024, Vol. 22, no. 2, pp. 4–7. DOI 10.1109/msec.2024.3359798. EDN WAYAMD.
10. Barabanov, A., Markov, A., Tsirllov, V. On Systematics of the Information Security of Software Supply Chains. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1294, pp. 115–129. DOI 10.1007/978-3-030-63322-6_9. EDN XBAAJE.
11. Williams, L., Benedetti, G., Hamer, S. [et al.] Research Directions in Software Supply Chain Security. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2025. DOI 10.1145/3714464. EDN GJABOU.

12. Kulikov, S. S., Belonozhkin, V. I., Yuyukin, N. A. Analysis of information security threats related to supply chain attacks. *Information and Security*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 135–140. DOI 10.36622/VSTU.2022.25.1.011. EDN GURLHF (In Russ.).
13. *ENISA Good practices for supply chain cybersecurity*, June, 2023. Available at: <https://www.enisa.europa.eu/publications/good-practices-for-supply-chain-cybersecurity> (accessed 29.09.2025).
14. *CISA securing the software supply chain recommended practices guide for developers*, August, 2022. Available at: <https://www.cisa.gov/resources-tools/resources/securing-software-supply-chain-recommended-practices-developers> (accessed 29.09.2025).
15. Semenov, K. V., Promyslov, V. G. Methodology for assessing the need for security updates in industrial systems. *Management Problems*, 2025, no. 2, pp. 58–73. EDN YVANRD (In Russ.).
16. Shin, H. Ch., Oh, M. Ho, Gong, Ju. S., Kim, J. M. Supply chain attack detection technology using ELK stack and Sysmon. *Journal of Information and Security*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 13–18. DOI 10.33778/kcsa.2020.20.3.013. EDN XDEGOE.
17. Haider, R. Z., Aslam, B., Abbas, H., Iqbal, Z. C2-Eye: framework for detecting command and control (C2) connection of supply chain attacks. *International Journal of Information Security*, 2024. DOI 10.1007/s10207-024-00850-y. EDN CTLRZL.
18. Serdny, A. L., Gerasimov, I. V., Makarov, O. Yu., Pasternak, Yu. G., Tikhomirov, N. M. Technology for identifying information about vulnerabilities in third-party components of open source software. *Information and Security*, 2020, vol. 23, no. 3 (4), pp. 347–364 (In Russ.).
19. Barabanov, A. V., Markov, A. S., Cirlov, V. L. Actual issues of identifying vulnerabilities and undeclared features in software. *High Availability Systems*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 12–17. DOI 10.18127/j20729472-201803-03. EDN VKADRP (In Russ.).
20. Markov, A. S., Cirlov, V. L. Audit of the software code according to security requirements. *Information Security*, 2008, no. 2, pp. 56–57. EDN YJDPFN (In Russ.).
21. Varenitsa, V. V., Markov, A. S., Savchenko, V. V., Cirlov V. L. Practical aspects of vulnerability detection during certification tests of information security software. *Cybersecurity Issues*, 2021, no. 5 (45), pp. 36–44. DOI 10.21681/2311-3456-2021-5-36-44. EDN TBQOCG (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 01.04.2026; принята к публикации 13.04.2026.

The article was submitted 05.02.2026; approved after reviewing 01.04.2026; accepted for publication 13.04.2026.

УДК 004.056

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.009

СОЗДАНИЕ ИЗОЛИРОВАННОГО ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ, ЗАХВАТА И ПЕРЕДАЧИ ОБРАЗЦОВ ТРАФИКА ХОСТ-СИСТЕМЕ

Федоров Мирослав Александрович, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 40, магистрант, ORCID: 0009-0007-8621-3822, e-mail: miroslav-mir@yandex.ru

Новохрестов Алексей Константинович, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 40, кандидат технических наук, доцент кафедры КИБЭВС, ORCID: 0000-0002-0916-105X, e-mail: aleksei.k.novokhrestov@tusur.ru

В статье рассматривается разработка изолированного виртуального стенда для генерации, захвата и передачи образцов сетевого трафика в условиях контролируемого экспериментирования. Архитектура решения основана на комбинации инструментов контейнеризации Podman и виртуализации QEMU/KVM, что обеспечивает многоуровневую изоляцию экспериментальной среды от хост-системы и внешних сетей. Ключевым элементом предложенного подхода является выделение сетевого стека стенда в отдельное network namespace с организацией связности через виртуальный мост и TAP-интерфейс. Для обеспечения безопасности на границе «хост/стенд» реализована stateful-фильтрация трафика средствами iptables, разрешающая только ответные соединения на инициированные хостом запросы. В работе описан процесс модификации RAW-образа Kali Linux для работы в автономном режиме с использованием qemu-nbd, автоматизация развёртывания виртуальной машины посредством Cloud-Init, а также механизм захвата трафика с сохранением артефактов в формате PCAP средствами tcpdump. Результаты А/В-валидации подтверждают работоспособность предложенной архитектуры. Созданный конвейер представляет собой воспроизводимый инструмент для исследования сетевой активности и формирования специализированных датасетов в задачах информационной безопасности.

Ключевые слова: Podman, QEMU, Linux, NBD, KVM, Cloud-Init, виртуализация, контейнеризация, сетевой трафик, захват трафика, информационная безопасность

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания ТУСУРа на 2026–2028 гг. (проект № FEWM-2026-0009).

CREATING AN ISOLATED VIRTUAL ENVIRONMENT FOR GENERATING, CAPTURING, AND TRANSMITTING TRAFFIC SAMPLES TO THE HOST SYSTEM

Fedorov Miroslav A., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin St., Tomsk, 634050, Russian Federation, undergraduate, ORCID: 0009-0007-8621-3822, e-mail: miroslav-mir@yandex.ru.

Novokhrestov Alexey K., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin St., Tomsk, 634050, Russian Federation,

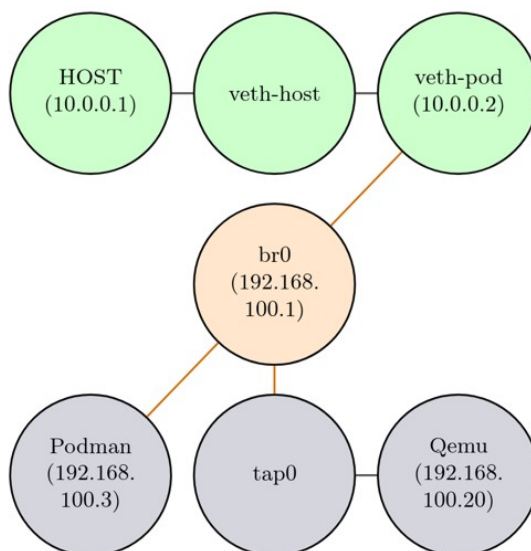
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of KIBEVS, ORCID: 0000-0002-0916-105X, e-mail: aleksei.k.novokhrestov@tusur.ru.

The paper presents the development of an isolated virtual testbed for generation, capture, and transmission of network traffic samples under controlled experimentation conditions. The architecture combines Podman containerization and QEMU/KVM virtualization tools, providing multi-level isolation of the experimental environment from the host system and external networks. A key element of the proposed approach is the separation of the testbed network stack into a dedicated network namespace with connectivity organized through a virtual bridge and TAP interface. To ensure security at the host/testbed boundary, stateful traffic filtering is implemented using iptables, allowing only response connections to host-initiated requests. The paper describes the Kali Linux RAW image modification process for offline operation using qemu-nbd, virtual machine deployment automation via Cloud-Init, and the traffic capture mechanism with PCAP artifact preservation using tcpdump. A/B validation results confirm the proposed architecture functionality. The created pipeline represents a reproducible tool for network activity research and specialized dataset formation in information security tasks.

Keywords: Podman, QEMU, Linux, NBD, KVM, Cloud-Init, virtualization, containerization, network traffic, traffic capture, information security

Financial support: this research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of Russia, Government Order for 2026–2028, project no. FEWM-2026-0009 (TUSUR).

Graphical annotation (Графическая аннотация)

**ВВЕДЕНИЕ**

Исследование сетевых явлений в контексте информационной безопасности требует контролируемых условий экспериментирования с сетевым трафиком, поскольку генерация потенциально вредоносного трафика в реальных сетях создает риски безопасности и нарушения функциональности для хост-системы и связанных с хост-системой узлов сети, а существующие методики оценки защищенности [1] требуют экспериментальной верификации в контролируемых условиях, что и определяет необходимость предлагаемого стенда. Это лежит в основе актуальности разработки гибких, автоматизированных и стремящихся к изоляции артефактов экспериментирования инструментов моделирования сетевой активности.

Целью данной работы является разработка и описание автоматизированного конвейера для развёртывания такой среды с использованием инструментов с открытым исходным кодом в экосистеме Linux. Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- 1) предварительно было выполнено редактирование RAW-образа Kali Linux для кастомизации, внедрения дополнительных утилит и отключения мешающих служб для работы без доступа в интернет;
- 2) была построена изолированная сетевая архитектура с применением сетевых пространств имён, виртуального моста и stateful-фильтрации на границе «хост/стенд»;
- 3) была реализована сборка специализированного Podman-контейнера, служащего управляющим узлом и (при необходимости) источником трафика;
- 4) автоматизирован запуск и базовая конфигурация целевой виртуальной машины QEMU с помощью Cloud-Init [2, 3] (сеть, доступ по SSH/консоли, средства захвата трафика).

Отличительной особенностью предложенного подхода является интеграция средств контейнеризации (Podman) и виртуализации (QEMU/KVM) в единый воспроизводимый конвейер, ориентированный на работу в офлайн-режиме. В отличие от известных решений, автоматизация развёртывания целевой среды обеспечивает её идемпотентность и позволяет осуществлять захват трафика с последующей передачей PCAP-артефактов на хост-систему с учётом односторонней инициации соединений, что исключает компрометацию хост-окружения.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

Для корректного сравнения при анализе следует разделять: 1) топологию сети (узлы/линки); 2) сетевую конфигурацию (адресация, маршрутизация); 3) политики (правила фильтрации/доступа); 4) средства контейнеризации/виртуализации; 5) средства получения PCAP/логов и иных артефактов. В данной статье целевой для пентеста системой является виртуальная машина на основе Qemu и KVM. Для получения данных из виртуальной машины хост инициирует доступ к сервису/каналу выгрузки (SSH/FTP) внутри виртуальной машины (при его наличии), при этом стенд не инициирует новые входящие соединения на хост (на границе хост/стенд применяются stateful-правила iptables, разрешающие только ответный трафик (ESTABLISHED, RELATED) на соединения, инициированные хостом).

Для сопоставления рассматриваются альтернативы, релевантные задаче локального стенда генерации/захвата трафика, по следующим критериям: 1) воспроизводимость на одной машине;

2) автоматизация развёртывания и идемпотентность; 3) уровень изоляции (контейнеризация/виртуализация); 4) управляемый вывод PCAP или логов на хост в условиях сетевой изоляции.

В дальнейшем анализируются решения, отражённые в источниках 1–4 (контейнерная генерация трафика; DeterLab; Mininet; подходы к формированию датасетов IDS):

1. **Удалённые testbed-платформы (DETERLab)** [4] являются предпочтительными, когда вывод эксперимента во внешнюю исследовательскую инфраструктуру, с принятием её правил эксплуатации, возможен и соответствует постановке задачи, но в данной работе задача следует учебным целям и подразумевает локальное экспериментирование на одной машине и вступает в противоречие с инструментами, зависящими от внешних площадок.

2. **Локальная эмуляция топологий (Mininet)** [5] может быть эффективна с точки зрения быстрого прототипирования сетей за счёт нативных Linux-процессов, однако зависимость от одного ядра Linux не обеспечивает требуемый уровень изоляции и безопасности экспериментирования по условиям данной задачи.

3. **Публичные датасеты (например, CICIDS2017)** [6], как показано в [7], часто страдают от несбалансированности и устаревших сценариев атак, не заменяют собой стенды генерации, но остаются полезными для сравнения и валидации собранных самостоятельно артефактов экспериментирования и методов генерации/анализа трафика.

4. **Генерация трафика на контейнерах (container-only)** [8] добавляет слой абстракции, требуемый для повышения уровня изоляции, обеспечивает модульность и воспроизводимость сценариев, однако не решает проблему зависимости эмулируемой среды от единственного Linux-ядра, что ограничивает безопасность и контроль за условиями экспериментирования.

5. **Подход данной работы (Podman + QEMU/KVM)** [9–12]. Контейнер используется как воспроизводимое управляющее окружение (сборка зависимостей, запуск и конфигурационные скрипты), а целевой узел реализуется как виртуальная машина на базе QEMU/KVM (внутри контейнерной среды), что позволяет объединить контейнерный и виртуальный уровни абстракции, дополнительно повысить изоляцию и снизить риски вредоносного воздействия экспериментов на хост-и связанные системы.

РЕДАКТИРОВАНИЕ RAW-ОБРАЗА KALI LINUX

Целью данного этапа является модификация RAW-образа Kali Linux, чтобы обеспечить его пригодность к работе в изолированной среде (без доступа в интернет) и необходимым для генерации и захвата трафика набором инструментов.

После того как был загружен неизменяемый kali-linux-cloud.raw-образ системы Kali Linux, данный образ с помощью qemu-nbd [13, 14] был примонтирован в хост-системе к директории /mnt/kali-root в качестве виртуального блочного устройства (Network Block Device), обеспечивая хосту доступ к внутренней системе с возможностью редактирования содержимого.

Для обеспечения беспрепятственной возможности ручной настройки сети в образе была осуществлена маскировка и отключение systemd-сервисов, связанных с исходной настройкой сети (например, для сервиса networking.service был создан симлинк на /dev/null). Дополнительно может применяться конфигурация cloud-init, отключающая автоматическую генерацию сетевой конфигурации, чтобы статические настройки, задаваемые позже через cloud-init, не перезаписывались.

Поскольку у предстоящей к реализации изолированной виртуальной среды не подразумевается доступ в интернет, на данном этапе также была создана bash-функция GET_DEB() для загрузки недостающих .deb-пакетов (tcpdump, libpcap и др.) с зеркала <https://mirror.truenetwork.ru/> и их копирования внутрь образа. Путём добавления скрипта /etc/rc.local обеспечивается установка этих пакетов при первом старте системы; для идемпотентности установки на практике требуется файл-маркер (например, /root/.packages_installed), который должен создаваться после успешной установки.

После этого неизменяемый образ Kali Linux был успешно размонтирован, а NBD-устройство [13, 14] было отключено. В результате ранее проведённых операций над образом была получена система, которая не будет пытаться самостоятельно получить IP-адрес по DHCP при инициализации, а также содержит необходимый для экспериментов набор утилит.

СЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА ИЗОЛИРОВАННОЙ СРЕДЫ

Далее было выполнено создание отдельного сетевого пространства имён (network namespace) под названием pod-net для обеспечения изоляции, при которой все сетевые интерфейсы и процессы, помещённые в данное пространство, будут изолированы от основной сети хоста, что критически важно для построения безопасной среды для экспериментирования с сетевым трафиком.

Внутри сетевого пространства pod-net был создан и наделён IP-адресом (192.168.100.1) мост [15] br0, обеспечивающий связность узлов сети. Был создан и подключён к мосту TAP-интерфейс [16], обеспечивающий виртуальной машине возможность взаимодействовать с Podman через br0.

Для передачи артефактов (например, .pcap) на хост организован виртуальный канал связи в виде veth-пары [16]: один конец остаётся на хосте, другой – переносится внутрь pod-net. На хосте

задаётся статический маршрут, указывающий, что трафик для подсети 192.168.100.0/24 должен направляться через veth-host на адрес 10.0.0.2 (внутренний конец veth-пары); далее маршрутизация в pod-net доставляет пакеты в сегмент br0/tap0.

Для усиления изоляции на стороне хоста реализована функция SETUP_FIREWALL() (рис. 1), настраивающая stateful-фильтрацию iptables: разрешается инициирование соединений хостом в сторону стенда и только ответный трафик обратно, а новые входящие соединения со стороны стенда на хост блокируются. Такая политика фильтрации непосредственно реализует рекомендации модели угроз программному обеспечению сетей [17], предотвращая несанкционированную инициацию соединений со стороны виртуальной среды.

```
SETUP_FIREWALL() {
    { sudo sysctl -w net.ipv4.ip_forward=1 >/dev/null && \
      # Разрешаем трафик ОТ хоста В сетевое пространство pod-net
      { sudo iptables -C FORWARD -i veth-host -o veth-pod -j ACCEPT 2>/dev/null || \
        sudo iptables -A FORWARD -i veth-host -o veth-pod -j ACCEPT
      } && \
      # Разрешаем трафик ИЗ сетевого пространства pod-net только если это ОТВЕТ
      { sudo iptables -C FORWARD -i veth-pod -o veth-host \
        -m state --state ESTABLISHED,RELATED -j ACCEPT 2>/dev/null || \
        sudo iptables -A FORWARD -i veth-pod -o veth-host \
        -m state --state ESTABLISHED,RELATED -j ACCEPT
      } && \
      # Разрешаем хосту принимать ответы от pod-net
      { sudo iptables -C INPUT -i veth-host \
        -m state --state ESTABLISHED,RELATED -j ACCEPT 2>/dev/null || \
        sudo iptables -A INPUT -i veth-host \
        -m state --state ESTABLISHED,RELATED -j ACCEPT
      } && \
      # ЗАПРЕЩАЕМ все остальное (новые соединения от pod-net)
      { sudo iptables -C INPUT -i veth-host -j DROP 2>/dev/null || \
        sudo iptables -A INPUT -i veth-host -j DROP
      }
    } && echo "Файрвол настроен (изоляция хоста усилена, INPUT закрыт)." || \
    { echo "Настройка файрвола НЕ УДАЛАСЬ!" >&2; exit 1; }
}
```

Рисунок 1 – Функция настройки правил фильтрации трафика от pod-net

Далее настройка сети выполняется внутри Podman-контейнера: lo и tap0 передаются в контейнер через ENTRYPOINT, настраиваются маршруты к подсетям стенда и хоста (через veth-pod), а также отключается rp_filter для предотвращения ложного отбрасывания пакетов при асимметричной маршрутизации.

СБОРКА PODMAN-КОНТЕЙНЕРА С KALI LINUX

Сборка Podman-контейнера [9] начинается с указания в Containerfile базового образа kalilinux/kali-last-release, после чего в /etc/apt/sources.list прописывается зеркало <https://mirror.truenetwork.ru/> для ускорения и надежности загрузки необходимых на этапе сборки контейнера пакетов.

В Containerfile выполняется последовательная установка необходимых для среды пакетов, начиная с базовых (ca-certificates, wget) и заканчивая системными (iproute2, qemu-kvm, genisoimage). После каждого RUN-слоя проводится очистка кэша (apt-get clean) для предотвращения разрастания размера образа.

После этого ранее подготовленный на хосте неизменяемый образ Kali Linux, предназначенный для запуска виртуальной машиной Qemu, был скопирован в Podman-контейнер вместе со скриптами, подготовленными для финальной настройки сети в контейнере Podman, а также запуска виртуальной машины Qemu через ENTRYPOINT в Containerfile.

В зависимости от сетевой конфигурации хоста может потребоваться дополнительная настройка зеркал в /.config/containers/registries.conf или /etc/containers/registries.conf для обеспечения доступа к docker.io и другим внешним ресурсам.

Далее настройка сети выполняется внутри Podman-контейнера: lo и tap0 передаются в контейнер через ENTRYPOINT, настраиваются маршруты к подсетям стенда и хоста (через veth-pod), а также отключается rp_filter для предотвращения ложного отбрасывания пакетов при асимметричной маршрутизации.

```
[[registry]]
prefix = "docker.io"
location = "docker.io"
[[registry.mirror]]
location = "cr.yandex/mirror" # Зеркало от Яндекс
[[registry.mirror]]
location = "dh-mirror.gitverse.ru" # Зеркало от GitVerse
[[registry.mirror]]
location = "docker.m.daocloud.io" # Зеркало от DaoCloud
```

Рисунок 2 – Настройка зеркал для загрузки образов контейнеров

ЗАПУСК QEMU С CLOUD-INIT-КОНФИГУРАЦИЕЙ

Для подготовки запуска виртуальной машины был подготовлен и скопирован в контейнер bashскрипт, в котором реализована предварительная проверка доступности неизменяемого образа, а также создание QCOW2-образа (при его отсутствии) для работы в persistent-режиме с backing-файлом [15] на неизменяемый образ с Kali Linux, что обеспечило сохранение меняющегося состояния системы, запущенной в виртуальной машине, без изменения исходного неизменяемого образа.

В Cloud-Init-конфигурации системе в виртуальной машине был выделен статический IP (192.168.100.20 с шлюзом 192.168.100.1) [1, 2]. Также были изменены параметры ядра (отключены `gr_filter`, `SYN cookies` и увеличены `backlog`-и) для раскрытия уязвимостей системы возможными сценариями пентеста.

ISO-образ Cloud-Init [1, 2] собирается утилитой `genisoimage` и подключается в качестве CD-ROM. QEMU запускается в KVM-режиме [8–10] с 6 GB памяти, 2 ядрами (привязка к CPU 0–1 через `taskset`), `virtio`-дисками, TAP-интерфейсом `tap0` и серийным выводом в стандартный вывод (без графического интерфейса, в `headless`-режиме).

```
exec taskset -c 0-1 qemu-system-x86_64 \
-enable-kvm -cpu host -m 6144 -smp 2 \
-drive file="${DISK_RUNTIME}",if=virtio,format=qcow2,snapshot=off,cache=writeback \
-drive file="${CLOUD_ISO}",if=virtio,media=cdrom,readonly=on \
-netdev tap,id=net0,ifname=tap0,script=no,downscript=no \
-device virtio-net-pci,netdev=net0,mac=52:54:00:12:34:56 \
-serial stdio -display none
```

Рисунок 3 – Запуск виртуальной машины в persistent-режиме

В Cloud-Init-конфигурации также были описаны `alias`-ы и функции, предназначенные для добавления в `bashrc` целевой (для генерируемого трафика) системы, предназначенные для управления сценариями прослушивания, сохранения образцов трафика в соответствующие отдельно взятым видам трафика `.pcap`-файлы.

Захват трафика был реализован функцией `dumpport()`, которая принимает на вход порядковый номер, на основании которого формируется название целевого для трафика `.pcap`-файла. `tcpdump` [16] запускается на интерфейсе `eth0` с захватом полных пакетов (`-s 0`), без DNS-разрешения (`-n`), в реальном времени (`-U`), исключая порт 9000 для HTTP-сервера, обеспечивающего хосту доступ к директории сохранения `.pcap`-файлов – `/root/.pcap`. Сбрасываются правила `iptables` [17] для гарантированного прохождения любого трафика. Помимо этого, были реализованы функции для отслеживания состояния `.pcap`-файлов, остановки сценариев прослушивания и т. д.

```
tcpdump -i "$IFACE" -s 0 -n -U -B 40960 -w "$file" \
'host 192.168.100.20 and not port 9000' \
>/dev/null 2>&1 &
```

Рисунок 4 – Команда запуска захвата трафика с исключением служебного порта

СБОРКА PODMAN-КОНТЕЙНЕРА С KALI LINUX

Валидация выполнена в формате A/B (до/после развёртывания). Для каждой метки собирались одинаковые артефакты: `netns`, `route`, `iptables (INPUT)`, `ping (ICMP)` и `pcap`. Сравнение проводилось стандартной в Linux утилитой `diff` по текстовым логам. Также на основе полученных логов была составлена CSV-таблица – такой подход позволяет наглядно показать изменения, вносимые развёртыванием, без дополнительных интерпретаций.

Таблица – Краткая сводка (результаты А – В)

Проверка	Комментарий и фрагмент лога
namespace	pod-net (id: 0) (появился в В)
route	в В: 10.0.0.0/30 dev veth-host и 192.168.100.0/24 via 10.0.0.2 dev veth-host
policy (INPUT)	добавлены правила -A INPUT -i veth-host -m state --state RELATED, ESTABLISHED -j ACCEPT и -A INPUT -i veth-host -j DROP
icmp (хост – VM)	В: 2 transmitted, 2 received, 0 % packet loss
pcap (захват)	В: захвачено 4 packets (ICMP эхо-запросы и ответы)

Ключевые отличия из diff-сравнения:

– **iptables** (sudo iptables -S INPUT):

-P INPUT ACCEPT

+ -A INPUT -m comment --comment "netavark firewall rules" -j NETAVARK_INPUT

+ -A INPUT -i veth-host -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j ACCEPT

+ -A INPUT -i veth-host -j DROP

Интерпретация: применена ожидаемая stateful-фильтрация; видно вмешательство подсистемы контейнеризации (цепочка NETAVARK_INPUT);

– **netns** (sudo ip netns list):

+ pod-net (id: 0)

Интерпретация: создано изолированное сетевое пространство;

– **route** (ip route show):

+ 10.0.0.0/30 dev veth-host

+ 192.168.100.0/24 via 10.0.0.2 dev veth-host

Интерпретация: настроена L3-доставка трафика к подсети ВМ;

– **ping** (ping -n -c2 -W1 192.168.100.20):

+ 2 packets transmitted, 2 received, 0% packet loss

+ rtt min/avg/max/mdev = 0.254/0.323/0.393/0.069 ms

Интерпретация: базовая связность между хостом и ВМ подтверждена;

– **pcap** (sudo timeout 6 tcpdump -nni veth-host -c 20 -w pcap.pcap host 192.168.100.20 и tcpdump -nn -r pcap.pcap -c 200):

- tcpdump: ./validation_logs/A/pcap.pcap: No such file or

↳ directory

+ reading from file ./validation_logs/B/pcap.pcap, link-type

↳ EN10MB (Ethernet), snapshot length 262144

+ 11:04:47.608495 IP 10.0.0.1 > 192.168.100.20: ICMP echo

↳ request, id 5, seq 1, length 64

+ 11:04:47.608854 IP 192.168.100.20 > 10.0.0.1: ICMP echo reply,

↳ id 5, seq 1, length 64

+ 11:04:48.623423 IP 10.0.0.1 > 192.168.100.20: ICMP echo

↳ request, id 5, seq 2, length 64

+ 11:04:48.623643 IP 192.168.100.20 > 10.0.0.1: ICMP echo reply,

↳ id 5, seq 2, length 64

Интерпретация: механизм захвата трафика работает корректно – pcap-файл содержит все ICMP-пакеты, использованные при валидации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана архитектура: Podman в качестве управляющей среды и QEMU/KVM в качестве целевой системы для приёма сетевого трафика. Предложенная архитектура обеспечивает все ранее обозначенные свойства, необходимые для локального стенда генерации и захвата трафика: воспроизводимость на одной машине, автоматизацию развёртывания, изоляцию гостевой ОС на уровне гипервизора и контролируемый вывод артефактов на хост. Валидация А/В подтверждает, что развёртывание создаёт отдельное сетевое пространство (pod-net), настраивает маршрутизацию к подсети ВМ, накладывает stateful-политику на границе хост/pod-net и обеспечивает успешный захват трафика (на примере ICMP-пакетов). Данный конвейер представляет собой готовый воспроизводимый и безопасный инструмент для исследования сетевой активности и генерации специализированных датасетов при условии явной фиксации сценариев и параметров захвата.

Перспективы дальнейших исследований включают: масштабирование архитектуры для параллельной генерации примеров вредоносного трафика с распределённой нагрузкой, формализацию библиотеки воспроизводимых сценариев вредоносного трафика различных типов, а также разработку механизмов автоматической разметки собранного трафика на основе временных меток запущенных сценариев. Это позволит повысить реалистичность генерируемых датасетов и снизить трудоёмкость подготовки обучающих выборок для систем обнаружения вторжений.

Список источников

1. Новохрестов, А. К. Оценка качества защищенности компьютерных сетей / А. К. Новохрестов, А. А. Конеv // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 4. – С. 85–87.
2. NoCloud Datasource // cloud-init.io: Documentation. – URL: <https://cloudinit.readthedocs.io/en/latest/reference/datasources/nocloud.html> (дата обращения: 30.10.2025).
3. Установка cloud-init, сценарии и использование в облачных средах // РЕД ОС: Документация. – URL: https://redos.red-soft.ru/base/redos-7_3/7_3-administration/7_3-virt-and-emul/7_3-cloud-init/ (дата обращения: 30.10.2025).
4. Mirkovic, J. Преподавание кибербезопасности с помощью DeterLab / J. Mirkovic, T. Benzel // IEEE Security & Privacy. – 2012. – Vol. 10, № 1. – P. 73–76. – DOI 10.1109/MSP.2012.23.
5. Lantz, B. Сеть в ноутбуке: быстрое прототипирование для программноконфигурируемых сетей / B. Lantz, B. Heller, N. McKeown // Труды 9-го семинара ACM SIGCOMM по горячим темам в сетях (HotnetsIX). – New York : ACM, 2010. – Article 19. – DOI 10.1145/1868447.1868466.
6. Sharafaldin, I. К созданию нового набора данных для обнаружения вторжений и характеристике вторжений / I. Sharafaldin, A. H. Lashkari, A. A. Ghorbani // Труды 4-й Международной конференции по безопасности и конфиденциальности информационных систем (ICISSP 2018). – Setubal : SciTePress, 2018. – T. 1. – С. 108–116. – DOI 10.5220/0006639801080116.
7. Alshaibi A. The Comparison of Cybersecurity Datasets / A. Alshaibi, M. Al-Ani, A. Al-Azzawi, A. Konev, A. Shelupanov // Data. – 2022. – Vol. 7, issue 2. – P. 18–2.
8. Clausen H., Flood R., Aspinall D. Генерация трафика с использованием контейнеризации для машинного обучения // Труды семинара 2019 года по динамическим и новым достижениям в машинном обучении и интеллектуальной кибербезопасности (DYNAMICS 2019). – New York : ACM, 2019. – Article No. 1. – DOI 10.1145/3464458.3464460.
9. Podman – Документация для разработчиков // Astra Linux. – URL: <https://docs.astralinux.ru/latest/guide/virtual/podman/> (дата обращения: 12.10.2025).
10. QEMU System Emulation Documentation. Version 10.2 // QEMU Project. – 2025. – URL: <https://www.qemu.org/docs/master/system/> (дата обращения: 12.10.2025).
11. Создание виртуальных машин с помощью Qemu KVM // OpenNet.ru : портал об открытом ПО. – 2022. – URL: https://opennet.ru/tips/3209_qemu_kvm_virtual.shtml (дата обращения: 12.10.2025).
12. Как установить и пользоваться QEMU // Selectel : блог о технологиях. – URL: <https://selectel.ru/blog/tutorials/qemu/> (дата обращения: 12.10.2025).
13. qemu-nbd – QEMU Disk Network Block Device Server // QEMU Official Documentation. – 2025. – URL: <https://www.qemu.org/docs/master/tools/qemu-nbd.html> (дата обращения: 25.09.2025).
14. Работаем с образами дисков KVM с помощью NBD // OSLogic: База знаний. – URL: <https://www.oslogic.ru/knowledge/666/rabotaem-s-obrazami-diskov-kvm-s-pomoshhyu-nbd/> (дата обращения: 25.09.2025).
15. Настройка сетевого моста в Linux (Linux Bridge): пошагово // Serverspace.ru: блог о технологиях. – 2024. – URL: <https://serverspace.ru/support/help/kak-nastroit-setevoj-most-v-linux/> (дата обращения: 02.10.2025).
16. Как работает сеть в контейнерах: Docker Bridge с нуля // Habr. – URL: <https://habr.com/ru/articles/790212/> (дата обращения: 28.09.2025).
17. Novokhrestov A., Konev A., Shelupanov A. Model of Threats to Computer Network Software // Symmetry. – 2019. – Vol. 11, issue 12. – P. 1506.
18. QCOW2 backing files & overlays // Fedora People: Kashyap Chamarthy. – URL: <https://kashyapc.fedorapeople.org/virt/lc-2012/snapshots-handout.html> (дата обращения: 16.10.2025).
19. Руководство по tcpdump // HackWare.ru. – URL: <https://hackware.ru/?p=10246> (дата обращения: 15.11.2025).
20. iptables(8) – manpages-ru // Debian unstable: manpages. – URL: <https://manpages.debian.org/unstable/manpages-ru/iptables.8.ru.html> (дата обращения: 04.10.2025).

References

1. Novokhrestov, A. K., Konev, A. A. Assessment of the quality of computer network security. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2014, no. 4, pp. 85–87 (In Russ.).
2. NoCloud Datasource. *cloud-init.io: Documentation*, 2024. Available at: <https://cloudinit.readthedocs.io/en/latest/reference/datasources/nocloud.html> (accessed 30.10.2025).
3. Installing cloud-init, scenarios and usage in cloud environments. *RED OS: Documentation*. Available at: https://redos.red-soft.ru/base/redos-7_3/7_3-administration/7_3-virt-and-emul/7_3-cloud-init/ (accessed 30.10.2025) (In Russ.).
4. Mirkovic, J., Benzel, T. Teaching Cybersecurity with DeterLab. *IEEE Security & Privacy*, 2012, vol. 10, no. 1, pp. 73–76. DOI 10.1109/MSP.2012.23.
5. Lantz, B., Heller, B., McKeown, N. A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks. *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks (Hotnets-IX)*. New York, ACM, 2010, article no. 19. DOI 10.1145/1868447.1868466.
6. Sharafaldin, I., Lashkari, A. H., Ghorbani, A. A. Toward Generating a New Intrusion Detection Dataset and Intrusion Traffic Characterization. *Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP 2018)*. Setubal, SciTePress, 2018, vol. 1, pp. 108–116. DOI 10.5220/0006639801080116.
7. Alshaibi, A., Al-Ani, M., Al-Azzawi, A., Konev, A., Shelupanov, A. The Comparison of Cybersecurity Datasets. *Data*, 2022, vol. 7, issue 2, pp. 18–22.

8. Clausen, H., Flood, R., Aspinall, D. Traffic Generation using Containerization for Machine Learning. *Proceedings of the 2019 Workshop on Dynamic and Novel Advances in Machine Learning and Intelligent Cyber Security (DYNAMICS 2019)*. New York, ACM, 2019, article no. 1. DOI 10.1145/3464458.3464460.
9. Podman – Developer Documentation. *Astra Linux*. Available at: <https://docs.astralinux.ru/latest/guide/virtual/podman/> (accessed 12.10.2025) (In Russ.).
10. QEMU System Emulation Documentation. Version 10.2. *QEMU Project*, 2025. Available at: <https://www.qemu.org/docs/master/system/> (accessed 12.10.2025).
11. Creating virtual machines using Qemu KVM. *OpenNet.ru: portal about open source software*, 2022. Available at: https://opennet.ru/tips/3209_qemu_kvm_virtual.shtml (accessed 12.10.2025) (In Russ.).
12. How to install and use QEMU. *Selectel: technology blog*. Available at: <https://selectel.ru/blog/tutorials/qemu/> (accessed 12.10.2025) (In Russ.).
13. qemu-nbd – QEMU Disk Network Block Device Server. *QEMU Official Documentation*, 2025. Available at: <https://www.qemu.org/docs/master/tools/qemu-nbd.html> (accessed 25.09.2025).
14. Working with KVM disk images using NBD. *OSLogic: Knowledge Base*. Available at: <https://www.oslogic.ru/knowledge/666/rabotaem-s-obrazami-diskov-kvm-s-pomoshhyu-nbd/> (accessed 25.09.2025) (In Russ.).
15. Configuring a network bridge in Linux (Linux Bridge): step by step. *Serverspace.ru: technology blog*, 2024. Available at: <https://serverspace.ru/support/help/kak-nastroit-setevoy-most-v-linux/> (accessed 02.10.2025) (In Russ.).
16. How networking works in containers: Docker Bridge from scratch. *Habr*. Available at: <https://habr.com/ru/articles/790212/> (accessed 28.09.2025) (In Russ.).
17. Novokhrestov A., Konev A., Shelupanov A. Model of Threats to Computer Network Software. *Symmetry*, 2019, vol. 11, issue 12, p. 1506.
18. QCOW2 backing files & overlays. *Fedora People: Kashyap Chamarthy*. Available at: <https://kashyapc.fedorapeople.org/virt/lc-2012/snapshots-handout.html> (accessed 16.10.2025).
19. tcpdump Guide. *HackWare.ru*. Available at: <https://hackware.ru/?p=10246> (accessed 15.11.2025) (In Russ.).
20. iptables(8) – manpages-ru. *Debian unstable: manpages*. Available at: <https://manpages.debian.org/unstable/manpages-ru/iptables.8.ru.html> (accessed 04.10.2025).

Статья поступила в редакцию 05.03.2026; одобрена после рецензирования 15.04.2026; принята к публикации 17.04.2026.

The article was submitted 05.03.2026; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 17.04.2026.

УДК 519.868

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.010

ИНФОРМАЦИОННОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭКОНОМИКИ

Гудиева Наталья Григорьевна, Северо-Кавказский федеральный университет, 355002, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
ассистент кафедры вычислительной математики и кибернетики, ORCID: 0000-0001-9341-8446,
e-mail: gudieva82@bk.ru

В работе решаются проблемы получения и верификации недостающей статистики для анализа устойчивости, экономической динамики и роста на основе динамического межотраслевого баланса и теории собственных динамических свойств экономических систем. Также обосновывается необходимость разработки новых теоретических и методических подходов к управлению экономическими системами с учётом их уникальных особенностей и влияния внешних факторов (социальных, политических, экологических). Экономика представляет собой динамическую систему, которая редко пребывает в равновесном состоянии. Для исследования таких систем лучшим из возможных является аппарат дифференциальных уравнений и методы их анализа. Акцентируется роль динамических моделей межотраслевого баланса для вариантных расчётов и поиска оптимальных стратегий в условиях изменяющегося рынка. Подчёркивается важность повышения качества статистических данных для точности экономических прогнозов и эффективности управленческих решений, а также необходимость создания макросистемы, обеспечивающей устойчивый рост валового внутреннего производства.

Ключевые слова: система дифференциальных уравнений, собственные динамические свойства, экономика, статистика, динамический межотраслевой баланс, динамические свойства экономики, показатели собственных динамических свойств межотраслевого баланса, макроэкономика, межотраслевой анализ, моделирование, прогнозирование

INFORMATION AND MATHEMATICAL SUPPORT FOR THE TASKS OF STRUCTURAL STABILITY OF ECONOMIC SYSTEMS

Gudieva Natalya G., North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355002, Russian Federation,

Assistant of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, ORCID: 0000-0001-9341-8446, e-mail: gudieva82@bk.ru

The paper solves the problems of obtaining and verifying missing statistics for the analysis of sustainability, economic dynamics and growth based on the dynamic intersectoral balance and the theory of intrinsic dynamic properties of economic systems. It also substantiates the need to develop new theoretical and methodological approaches to managing economic systems, taking into account their unique features and the influence of external factors (social, political, environmental). The economy is a dynamic system that is rarely in an equilibrium state. For the study of such systems, the best possible is the apparatus of differential equations and methods of their analysis. The role of dynamic models of intersectoral balance for variant calculations and the search for optimal strategies in a changing market is emphasized. The importance of improving the quality of statistical data for the accuracy of economic forecasts and the effectiveness of management decisions is emphasized, as well as the need to create a macro system that ensures sustainable growth in gross domestic production.

Keywords: system of differential equations, intrinsic dynamic properties, economics, statistics, dynamic intersectoral balance, dynamic properties of economics, indicators of intrinsic dynamic properties of intersectoral balance, macroeconomics, intersectoral analysis, modeling, forecasting

ВВЕДЕНИЕ

Анализ современных исследований в области математического моделирования макроэкономики показал, что изучаемые и смежные направления имеют большую историю в отечественной и зарубежной экономической науке. Доминируют здесь такие научные центры, как Центральный экономико-математический институт Российской академии наук (ЦЭМИ РАН), Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук (ИНП РАН), Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук (ИЭОПП СО РАН), ведущие университеты страны. Зарубежные исследования в большей степени представлены работами группы ИНФОРУМ (INFORUM), созданной почётным профессором Университета Мэриленда К. Алмоном [1], хотя и не исчерпываются ими. ИНФОРУМ как международный центр межотраслевых исследований, объединяющий и названные выше российские структуры

РАН, на постоянной основе разрабатывает модели, инструментарий, формирует прогнозы, которыми пользуются как фирмы, так и госструктуры по всему миру, проводит разнообразные отраслевые и межотраслевые исследования.

Широкую известность получили следующие макроэкономические модели и проекты: RIM (Russian Interindustry Model) – макроэкономическая межотраслевая модель рыночного равновесия российской экономики; QUMMIR (Quarter Macroeconomic Model of Interactions for Russia) – квартальная макроэкономическая эконометрическая модель; семейство моделей CGE (Computable General Equilibrium) – вычислимого общего равновесия.

Особого внимания заслуживают материалы конференции ИНП РАН «Прогнозирование экономического роста» (2017 г.), приуроченной к 80-летию акад. Ю. В. Яременко. На мероприятии рассмотрены актуальные аспекты межотраслевого анализа.

В работе конференции участвовали учёные ИНП РАН: В. В. Ивантер, М. Н. Узьяков, Г. Р. Серебряков, А. Г. Коровкин, Т. Н. Федоровская, С. Н. Македонский, А. А. Херсонский, О. Ю. Шибалкин, А. А. Широков, И. Б. Королев, А. В. Полежаев, А. А. Янговский и др. Они выступили авторами научного доклада «Структурно-инвестиционная политика в целях устойчивого роста и модернизации экономики», который прямо связан с темой представленного исследования. Доклад и другие работы упомянутых учёных доступны в сети Интернет. Журнал «Проблемы прогнозирования» широко освещает межотраслевые исследования: отдельные статьи и целые номера посвящены использованию моделей межотраслевого баланса в науке и экономической политике.

Значимые результаты получены в работах А. А. Широкова [2] и Р. М. Узьякова [3] с применением метода «затраты – выпуск». Особо выделяется статья Р. М. Узьякова «Использование межотраслевого инструментария в анализе динамики российской экономики в 1991–2013 гг. [4], в которой:

- анализируется влияние макроструктурных факторов (конечного спроса и матрицы коэффициентов прямых затрат) на динамику суммарного валового выпуска РФ (1990–2013 гг.);
- оцениваются вклады этих факторов в экономическую динамику в периоды трансформационного спада (1991–1998 гг.) и восстановительного роста (1999–2013 гг.);
- поднимается проблема создания собственной статистической базы для математического моделирования в экономике.

Другие ключевые исследования:

- Н. В. Суворов и Е. Е. Балашова [5] – взаимосвязи структурных изменений, внешнеэкономических связей и инвестиционной деятельности;
- А. Р. Саяпова, А. А. Широков, А. А. Янговский [2] – экономические связи на постсоветском пространстве на основе межотраслевого баланса и совершенствование модели RIM;
- Н. В. Суворов [6], А. В. Бузгалин, А. Г. Гранберг [7, 8], М. С. Гусев, С. В. Дегтярева [9, 10] – применение межотраслевого метода в прогнозно-аналитических исследованиях;
- К. Алмон [11] – мировая практика метода «затраты – выпуск»;
- А. Ю. Маслов [12] – методы построения симметричных таблиц;
- П. А. Суворов – методики сопоставительного анализа экономик;
- коллектив ИЭОПП СО РАН под руководством В. И. Суслова [13, 14] – оценка инвестиционных проектов и пространственного размещения экономики (с пересечением межотраслевой и агентоориентированной методик);
- Э. И. Позамантир [15] – развитие и применение динамического межотраслевого баланса и модели вычислимого общего равновесия (без использования дифференциальных уравнений динамики).

В данной статье представлено научное исследование, в котором решаются проблемы получения и верификации недостающей статистики для анализа устойчивости, экономической динамики и роста на основе динамического межотраслевого баланса (МОБ) и теории собственных динамических свойств (СДС) экономических систем.

Направление исследования определено актуальностью использования дифференциальных уравнений МОБ в анализе экономической и структурной динамики (о чём писали В. Леонтьев и К. Алмон) и нерешённостью этой задачи, несмотря на многочисленные попытки.

ПОКАЗАТЕЛИ СОБСТВЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА

Динамическая модель МОБ, в отличие от статической, должна обеспечивать среднесрочное прогнозирование (до 5 лет) на основе предположения В. Леонтьева о высокой стабильности коэффициентов модели.

Её первая экспериментальная проверка в начале 1950-х гг. не увенчалась успехом. Сам В. Леонтьев до конца жизни искал экономически интерпретируемые результаты общего решения своей модели.

Математики охотно решали системы дифференциальных уравнений, моделирующие работу сложных систем, но полученные в ходе поиска интегральных кривых валового производства результаты не имели экономического смысла. Несмотря на растущее число учёных, работавших с моделью, добиться успеха не удавалось. В итоге модель на базе дифференциальных уравнений признали непригодной для экономики, а статические модели плохо подходили для динамических задач (они давали решение лишь на один год).

Представленная работа меняет ситуацию в решении этой проблемы.

Динамический МОБ – структурная модель экономики, формализуемая через системы разностных или дифференциальных уравнений. Например, разностную модель можно представить следующим уравнением:

$$X(t) - AX(t) - B(X(t+1) - X(t)) = Y(t), \quad (1)$$

где $X(t)$ – вектор-функция валовых выпусков (итого использование);

$Y(t)$ – вектор-функция совокупного конечного спроса;

A – матрица коэффициентов прямых затрат;

B – матрица межотраслевых инерционностей, которая имеет размерность времени (ранее на её месте в модели располагалась матрица приростных фондоёмкостей).

Переход к непрерывной модели приводит (1) к системе дифференциальных уравнений [16]:

$$(I - A)X(t) - B\dot{X}(t) = Y(t), \quad (2)$$

где I – вектор инвестиций из статистических сборников «Национальные счета России...».

Анализ колебательной устойчивости (при комплексно-сопряжённых парах собственных чисел матрицы состояния) и динамики роста/спада производства осуществляется на основе собственных значений матрицы, замкнутой по потреблению модели (2) в нормальной форме Коши.

Для замыкания модели нужно выразить вектор потребления $Y(t)$ через остальные переменные – например, установить единицы измерения объёма труда, необходимого в каждой отрасли для производства единицы её продукта. Для упрощения анализа считаем, что труд не классифицируется по категориям.

Пусть $a_{n+1,i}$ – количество труда, необходимого отрасли i для выпуска единицы продукта за время t , тогда для выпуска вектора продукции $X(t)$ за тот же период потребуется $\sum_{i=1}^n a_{n+1,i}x_i(t)$ единиц труда.

Предположим, что единица труда потребляет за время t продукцию отрасли i в объёме q_i , тогда

$$y_i(t) = q_i \sum_{j=1}^n a_{n+1,j}x_j(t),$$

или в матричном виде

$$Y(t) = QX(t), \quad (3)$$

где Q – матрица размерностью $n \times n$, имеющая i -ю строку вида

$$q_i a_{n+1} = q_i \sum_{j=1}^n a_{n+1,j}.$$

Подставив (3) в (2), получим систему

$$\dot{X}(t) = GX(t), \quad (4)$$

где $G = B^{-1}(E - A - Q)$.

Таким образом, определение матрицы $(E - A - Q)$ обеспечивает замыкание экономической модели (2) по конечному потреблению.

Важно подчеркнуть, что подход должен учитывать фундаментальное ограничение: темпы роста трудовых ресурсов не могут устойчиво превышать темпы роста населения – это отражает базовый принцип демографически обусловленного экономического развития.

Классический анализ переходных процессов позволяет получить общее решение однородной системы (4) для i -й отрасли, где постоянные интегрирования определяются начальными условиями системы; показатели экспонент соответствуют корням характеристического уравнения, совпадающим с собственными значениями матрицы межотраслевых связей. Общее решение однородной системы (4) для i -й отрасли имеет вид

$$x_i(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + c_n e^{\lambda_n t},$$

где $c_1, c_2, \dots, c_n$ – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – корни характеристического уравнения, равные собственным значениям матрицы G .

С экономической точки зрения решение отражает фундаментальную зависимость: динамика развития отрасли определяется, с одной стороны, исходными условиями её функционирования, а с другой – внутренними свойствами системы, закодированными в спектральных характеристиках матрицы межотраслевых взаимодействий. Экспоненциальные компоненты решения показывают,

как факторы производства (капитал, труд, технологии) трансформируются в рост или спад в конкретном секторе экономики.

Современные исследования [17, 18] подтверждают следующий тезис: эффективное управление циклической устойчивостью макроэкономических систем требует анализа их ключевых динамических характеристик – частот колебаний, коэффициентов затухания возмущений и показателей управляемости. Теоретическая база для таких расчётов – динамическая версия модели межотраслевого баланса (система дифференциальных уравнений [16]). Модель позволяет:

- исследовать взаимосвязи между секторами экономики;
- анализировать их динамические свойства и межотраслевые инерционности;
- количественно оценивать устойчивость системы к внешним шокам и внутренним дисбалансам, что особенно важно в условиях нестабильности глобальных процессов.

Подходы А. Г. Гранберга [19] остаются важным инструментом анализа, но имеют недостаток: не дают полной информации о доминирующих корнях характеристического уравнения и их чувствительности к вариациям параметров. Это ограничивает анализ динамических свойств систем. Поэтому особую актуальность приобретают матричные методы, которые позволяют:

- проводить комплексное исследование на основе собственных чисел и векторов матрицы состояния системы G (4);
- детально изучать сложные системы с разнородными динамическими характеристиками.

В структурном анализе отдельно выделяются задачи оптимизации и численного поиска. Их эффективность зависит от обоснованного выбора критерия качества, который должен:

- с содержательной стороны – отражать расположение корней характеристического уравнения в комплексной плоскости, учитывать плановые показатели роста, гарантировать устойчивость и быть адаптивным к алгоритмам выбора вектора варьируемых параметров;
- с математической стороны – обеспечивать гладкость целевой функции (существование непрерывных производных по варьируемым параметрам) и совместимость с классическими методами оптимизации.

В полной мере указанным требованиям отвечает функционал специального вида:

$$F = \sum_{\alpha_i \leq \lambda_0} (\lambda_0 - \alpha_i)^v + \sum_{\omega_i \neq 0} \omega_i^v, \quad (5)$$

который позволяет комплексно оценивать как динамические характеристики системы, так и её соответствие целевым показателям экономического развития. В выражении (5) α_i – это вещественные составляющие корней характеристического уравнения, определяющие скорость затухания переходных процессов. Параметр λ_0 задаёт требуемый уровень роста производства, отражая целевые показатели развития системы. Целочисленный параметр v (принимаяющий значения 2, 3, 4 и т. д.) регулирует строгость критерия оптимальности. Определённое значение имеют мнимые составляющие ω_i , которые непосредственно связаны с колебательными процессами, характерными для макроэкономических систем и определяющими их циклическую динамику.

В условиях, когда имеются как вещественные, так и комплексные корни, рекомендуется использовать следующий минимизируемый функционал:

$$F = \sum_{\substack{\alpha_i \leq \lambda_0 \\ \omega_i = 0}} (\lambda_0 - \alpha_i)^v + \sum_{\substack{\alpha_i \leq \alpha_0 \\ \omega_i \neq 0}} (\alpha_0 - \alpha_i)^v. \quad (6)$$

Рассматриваемая экономико-математическая модель включает ряд ключевых параметров, каждый из которых имеет чёткую экономическую интерпретацию. Параметр λ_0 отражает целевой уровень роста производства, задавая ориентир для развития моделируемой системы.

В рамках рассматриваемой модели положим, что варьируемым параметром является некий u , а α_q – это вещественная составляющая корня характеристического уравнения, которая при численной оптимизации пересекает критическое (требуемое, желаемое) значение $\alpha_q = \alpha_0$, тем самым включаясь или исключаясь из суммы (6). Тогда дифференцирование функции качества по u даёт следующий результат [20]:

$$\frac{dF_q}{dy} = v (\alpha_0 - \alpha_q)^{v-1} \frac{d\alpha_q}{dy}. \quad (7)$$

Важное свойство функции качества проявляется при $v \geq 2$, когда первая производная F_q целевой функции в точке $\alpha_q(y) = \alpha_0$ обращается в нуль, что гарантирует гладкость этой производной dF_q/dy при изменении количества учитываемых слагаемых в выражении (6). Этого достаточно для сохранения гладкости функционала при использовании методов оптимизации первого порядка.

В случае применения алгоритмов, использующих вторые производные (методы Ньютона, квазиньютоновские методы), необходимо дополнительное условие непрерывности вторых производных, что можно увидеть при дифференцировании формулы (7):

$$\frac{d^2 F_q}{dy^2} = v(v-1)(\alpha_0 - \alpha_q)^{v-2} \left(\frac{d\alpha_q}{dy} \right)^2 + v(\alpha_0 - \alpha_q)^{v-1} \frac{d^2 \alpha_q}{dy^2}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что при использовании методов оптимизации порядка больше 2 необходимо иметь $v \geq 3$, поскольку при $v = 2$ непременно возникнет «скачок» второй производной.

Сказанное здесь и во многих других источниках делает динамическую модель МОБ (при условии обеспечения ее применимости для решения экономических задач) исключительно ценным инструментом для исследования фундаментальных характеристик сложных экономических систем, формирования и оценки эффективности структурной политики.

Центральное место в работе занимает систематическое изучение таких существенных аспектов, как устойчивость системы, степени роста (или спада) производства отдельных продуктов по Общероссийскому классификатору продукции по видам экономической деятельности (ОКПД), представленных в базовых таблицах «Затраты – выпуск» (ТЗВ) на сайте Росстата во вкладке «Национальные счета». В настоящее время представлены ТЗВ за 2011, 2016 и 2021 гг. Для строгого математического анализа используется замкнутая по потреблению модель МОБ, представленная в нормальной форме Коши:

$$\frac{dx}{dt} = GX, \quad X(0) = X_0. \quad (9)$$

Матрица состояния G из уравнения (9) представляет собой основной объект настоящего исследования. В математике и численном анализе это стандартная задача, предназначенная для анализа динамических систем самой разной природы. В межотраслевом анализе форма Коши (9) должна использоваться для выявления общих закономерностей и специфических особенностей динамики межотраслевых взаимодействий. Вместе с тем решение классических оптимизационных задач требует построения итерационных алгоритмов, требующих многократных вычислений целевых функций и их производных, что существенно увеличивает вычислительную нагрузку, если учесть, что трудоёмкость QR -алгоритма пропорциональна кубу размерности матрицы, к которой он применяется. Время оптимизации при десятках варьируемых параметров становится существенным для стандартных современных машин, на которых в основном решаются эти задачи. Требуется либо использование суперкомпьютеров, либо методов машинного обучения и искусственного интеллекта и прочих инструментов, преодолевающих «проклятие размерности». Указанные сложности преодолимы, важно иметь вычислимую, дающую адекватные результаты прогнозирования валового производства динамическую модель МОБ. В случае выполнения данного условия даже однократное вычисление собственных значений G открывает широкие перспективы в исследовании многообразных режимов функционирования экономических систем. Универсальность данного подхода позволяет успешно применять его на различных уровнях абстракции – от агрегированных макромоделей до детализированных отраслевых исследований, что подчеркивает его методологическую ценность для современного экономического и структурного анализа.

Собственные значения λ_i матрицы G играют определяющую роль в анализе динамических свойств системы. Их значимость обусловлена двумя ключевыми факторами: наблюдаемостью компоненты с экспонентой $e^{\lambda_i t}$ и управляемостью ею со стороны элементов вектора варьируемых параметров.

Изучение собственных векторов помогает понять взаимодействие компонентов системы и их изменения во времени. Каждое собственное значение и вектор раскрывают механизмы, что позволяет разрабатывать более эффективные стратегии управления и прогнозирования. Понимание этих взаимосвязей является ключом к анализу и оптимизации сложных динамических систем, представимых динамическими МОБ.

Наблюдаемость определяется мерой присутствия составляющих движения в компонентах вектора валового производства $X(t)$, который напрямую зависит от структуры соответствующих собственных векторов.

Управляемость характеризует эффективность воздействия элементов вектора варьируемых параметров на компоненты движения; определяется компонентами собственных векторов.

Рассмотрим систему (9). Пусть $\{U_i\}$, $\{V_i\}$ – собственные векторы матриц G и G^T соответственно, соответствующие собственному значению λ_i . Из теории линейной алгебры следуют основные тождества:

$$GU_i = \lambda_i U_i, \quad (10)$$

$$G^T V_i = \lambda_i V_i \quad (11)$$

или в альтернативной форме

$$V_i^T G = \lambda_i V_i^T.$$

Векторы U_i и V_i нормированы и удовлетворяют условию ортогональности при неравных i и j так, что

$$U_i^T V_j = V_j^T U_i = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j. \end{cases}$$

Для произвольной матричной функции $f(G)$ справедливо:

$$f(G)U_i = f(\lambda_i)U_i, \quad V_i^T f(G) = f(\lambda_i)V_i^T.$$

Непосредственная подстановка подтверждает тождественность этих выражений, что приводит к равенству (12)

$$f(G) = \sum_{i=1}^n U_i V_i^T f(\lambda_i). \quad (12)$$

Пусть матрица G системы (9) обладает простой структурой, т. е. имеет n линейно независимых собственных векторов, соответствующих n различным собственным значениям. Для такого случая выражение (12) для матричной экспоненты e^{Gt} принимает канонический вид

$$e^{Gt} = \sum_{i=1}^n U_i V_i^T e^{\lambda_i t}. \quad (13)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (9) выражается как

$$X(t) = e^{Gt} X_0.$$

С учётом соотношения (13) получаем фундаментальное разложение динамики выпуска $X(t) = \sum_{i=1}^n U_i V_i^T e^{\lambda_i t} X_0 = \sum_{i=1}^n c_i e^{\lambda_i t} U_i$, где коэффициенты разложения $c_i = V_i^T X_0$ определяются начальными условиями X_0 системы и элементами транспонированного собственного вектора V_i . Данное представление позволяет выразить компоненты вектора выпуска $x^{(k)}(t)$ через модальные составляющие (14), где каждая компонента $u_i^{(k)}$ отражает вклад соответствующей моды колебаний с номером k , характеризуемой элементами правых собственных векторов матрицы состояния U_i :

$$x^{(k)}(t) = \sum_{i=1}^n c_i e^{\lambda_i t} u_i^{(k)}, \quad k = 1, \dots, n. \quad (14)$$

Формула (14) позволяет провести детальный анализ наблюдаемости модальных составляющих в экономической системе.

Важным представляется случай нулевого значения компоненты собственного вектора $u_i^{(k)} = 0$. Если так, то соответствующая движения, определяемая экспонентой $e^{\lambda_i t}$, не наблюдается в выпуске $x^{(k)}(t)$, т. е. в выпуске продукта с номером k . Если компонента $u_i^{(k)}$ отлична от нуля, то отношение

$$\delta_i^{(l,k)} = \frac{|u_i^{(l)}|}{|u_i^{(k)}|} \quad (15)$$

Показывает, во сколько раз составляющая движения, определяемая экспонентой $e^{\lambda_i t}$, больше присутствует в отрасли l по сравнению с отраслью с номером k . Частное (15) не зависит от места и вида шоков в экономике. Если в качестве $u_i^{(k)}$ выступает максимальная компонента собственного вектора U_i , то все элементы $\delta_i^{(l,k)}$ образуют вектор коэффициентов наблюдаемости с движением $e^{\lambda_i t}$, в котором максимальный элемент равен 1. Ясно, что при использовании (15) не следует работать с нулевыми компонентами собственного вектора U .

Теперь изложим общие теоретические положения об управляемости составляющими движения. Анализ зависимости собственных чисел λ_i от варьируемых параметров (положим, что это y_j) приобретает принципиальное значение при исследовании управляемости динамических систем, представимых моделью (9). Ключевую роль в таком анализе играет функция чувствительности λ_i от y_j , выражаемая через соответствующие собственные векторы U_i и V_i . Данная характеристика может быть получена путём дифференцирования исходного уравнения (10) по рассматриваемому параметру y_j , получим следующий результат

$$\frac{\partial G}{\partial y_j} U_i + G \frac{\partial U_i}{\partial y_j} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial y_j} U_i + \lambda_i \frac{\partial U_i}{\partial y_j}. \quad (16)$$

Умножив (16) слева на V_i^T , получим

$$V_i^T \frac{\partial G}{\partial y_j} U_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial y_j} V_i^T U_i - (V_i^T G - \lambda_i V_i^T) \frac{\partial U_i}{\partial y_j}. \quad (17)$$

С учётом (11) выражение (17) сводится к уравнению

$$V_i^T \frac{\partial G}{\partial y_j} U_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial y_j} V_i^T U_i,$$

откуда окончательно имеем канонический результат [10]

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial y_j} = \frac{V_i^T \frac{\partial G}{\partial y_j} U_i}{V_i^T U_i}. \quad (18)$$

Ограничимся этим общим случаем и не станем рассматривать частный, когда варьируемым является непосредственно элемент матрицы G – это невозможная в межотраслевом анализе ситуация, где варьируются чаще всего межотраслевые инерционности или конечный спрос.

Форма представления коэффициентов чувствительности не только обладает математической строгостью, но и позволяет наглядно проследить влияние отдельных элементов матрицы системы на её спектральные характеристики, что особенно ценно при решении прикладных задач анализа и синтеза динамических систем. Формулы (18) служат эффективным инструментом для изучения динамики макроэкономических систем и разработки методов управления ими за счёт реализации структурных реформ и инвестиционных проектов. С их помощью можно анализировать влияние

и иных факторов на экономические процессы, что имеет существенное значение для понимания сложных взаимозависимостей в макроэкономической сфере.

Рассмотрим теперь возбуждаемость составляющих движения.

При исследовании возбуждаемости составляющих движения следует учитывать принципиальное различие между понятиями наблюдаемости и возбуждаемости компонент движения.

Для иллюстрации рассмотрим частный случай точечного возмущения, когда лишь одна компонента вектора начальных значений X_0 отлична от нуля и равна единице. В такой ситуации

$$c_i = V_i^T X_0 = v_i^{(k)}$$

и амплитуда составляющей движения с $e^{\lambda_i t}$ в переменной $x^{(j)}(t)$ равна

$$c_i u_i^{(j)} = v_i^{(k)} u_i^{(j)}.$$

Коэффициент возбуждаемости $e^{\lambda_i t}$ составляющей при возмущении по переменной $x^{(j)}$ определяется следующей величиной:

$$\gamma_i^{(j)} = \left| \frac{v_i^{(j)} u_i^{(j)}}{v_i^{(k)} u_i^{(j)}} \right| = \left| \frac{v_i^{(j)}}{v_i^{(k)}} \right|, \quad (19)$$

где $v_i^{(k)} = \max(v_i^{(l)})$;

$l = 1, \dots, n$ – максимальная компонента собственного вектора.

Формула предполагает использование при исключении из рассмотрения нулевых компонент собственного вектора – это понятно, деление на ноль надо исключить при работе с вектором V_i , как и ранее при работе с вектором U_i .

Если собственный вектор V_i из n элементов содержит нулевые, то по формуле (19) нам удастся вычислить только m коэффициентов возбуждаемости, где $m < n$. Полный вектор возбуждаемости для i -й составляющей движения выглядит следующим образом:

$$\Gamma_i = (\gamma_i^{(1)}, \gamma_i^{(2)}, \dots, \gamma_i^{(m)})^T.$$

Значения компонент полученного вектора лежат в диапазоне от 0 до 1, причём k -я компонента максимальна и равна 1. Вектор возбуждаемости служит важным инструментом для ранжирования отраслей по степени их потенциального влияния на возбуждение конкретных составляющих движения, что особенно значимо для выявления отраслей, возмущения в которых могут представлять большую значимость для экономической стабильности.

ИНФОРМАЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ БАЗА И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Эффективное функционирование экономики требует всестороннего и глубокого анализа, а также продуманного и последовательного подхода к проведению всех видов реформ, в особенности структурных. Исторический опыт и современность указывают на то, что без учета фундаментальных принципов и баланса между различными факторами экономического развития, прогноз по достижению устойчивого и благополучного будущего становится нерелевантным.

При обсуждении результативности экономических исследований и экономико-математического моделирования можно выделить два ключевых фактора.

Первым ключевым фактором становится власть лиц, принимающих экономические решения и/или имеющих окончательное влияние на эти решения – это хозяева «последнего слова». Без учёта интересов и приоритетов власти любое исследование или моделирование может стать бесполезным. Поэтому важно, чтобы экономическая наука имела тесные связи с лицами, принимающими решения, чтобы её результаты могли быть приняты во внимание при формировании всех аспектов экономической политики. Создание эффективного механизма обмена информацией между учёными и принимающими экономические решения лицами является необходимым условием для осуществления реального влияния научных результатов и рекомендаций на экономическую практику.

Вторым ключевым фактором является доступность и качество статистических данных. Чтобы развивать экономическую науку и добиваться её эффективного влияния на управление экономикой, необходимо обеспечить учёным максимально простой доступ к качественной экономической информации, включая отчётность и планово-прогнозные данные. В настоящее время проблема дефицита и ограниченности доступа к достоверной и полной статистической информации затрудняет проведение объективных исследований. Поэтому важно активно работать над повышением доступности и качества статистических данных, чтобы экономическая наука имела надёжную основу для проведения исследований и моделирования.

Проблемы с расходимостью и несводимостью статистических данных имеют серьёзные последствия. Даже передовые теоретико-методологические подходы, направленные на оптимизацию планирования, теряют эффективность в таких условиях. Важно, чтобы собранные показатели и опубликованные отчёты были связаны с реальным состоянием дел в стране, иначе они не будут иметь практической ценности [21, 22].

Важно понимать, что единственным путём к улучшению результатов экономических оценок является пересмотр и совершенствование процедур и стандартов измерений. Телеметрия, интернет, облачное хранение и другие инновации могут значительно повысить доступность, точность и достоверность статистических данных. Следует активно разрабатывать и эффективно внедрять новые стандарты там, где они ещё не применяются, чтобы исследования стали более совершенными и результативными. Важно также строго соблюдать уже существующие стандарты, так как это гарантирует чёткость и сопоставимость результатов.

Соблюдение этих принципов и использование передовых технологий станет ключом к повышению качества экономического моделирования и глубокому пониманию реальности.

Следует отметить, что статистика России не только имеет богатые традиции, но также является непрерывным источником вдохновения для многих сообществ учёных. Выдающаяся математико-статистическая школа России стала базой для многих инноваций и открытий в области статистики. Имена М. В. Ломоносова и В. Н. Татищева являются символами не только прошлого, но и будущего российской статистики. Они сформировали базу знаний, которая стала отправной точкой для многих исследований и достижений в данной области. Их вклад и влияние закреплены в истории развития российской науки и будут продолжать вдохновлять будущие поколения учёных на творчество и инновации в области статистики.

Следует отметить, что для плодотворной работы в области анализа СДС и прогнозирования в экономике на основе динамических моделей МОБ ТЗВ должны публиковаться (или пересчитываться) в одной и той же номенклатуре продуктов (или внешнеэкономической деятельности – ВЭД), в одном и том же, самом свежем ОКПД (или Общероссийском классификаторе видов экономической деятельности – ОКВЭД). Важны и сроки публикации – нельзя признать своевременной публикацию базовых ТЗВ в ОКПД-2 в разрезе 113 продуктов за 2021 г. весной 2025 г., да ещё без пересчёта ТЗВ за 2016 и 2011 гг., когда был ОКПД в разрезе 98 продуктов.

МОДЕЛИ МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА И ОСОБЕННОСТИ ИХ РАЗРАБОТКИ

В контексте долгосрочного моделирования экономических систем часто возникают ситуации, когда ошибки в исходных данных не являются редкостью. Критическую роль для достижения более значимых результатов при анализе динамических свойств таких систем играет контроль не только за временными зависимостями, но и за качеством исходных данных. Это особенно важно в случае отсутствия значимого научно-технического прорыва и быстрого внедрения его достижений.

Существуют две основные категории динамических моделей с изменяющимися по времени матрицами производственных методик:

- модели с матрицами традиционного межотраслевого баланса, где каждая отрасль представлена лишь одним производственным методом, который производит определённый набор продукции единой. Это классический подход, который предполагает статический обзор производственной деятельности;

- модели, где одна и та же отрасль может использовать несколько различных производственных методов в процессе производства. Это открывает новые горизонты для анализа и управления производственными процессами, позволяя более гибко реагировать на изменяющиеся условия и требования рынка.

Сосредоточимся на первой группе моделей. При составлении динамического межотраслевого баланса основную информационную нагрузку несут 3 матрицы производственных расходов: матрица затрат на производство, матрица объёмов выпуска и матрица резервов. Каждая из этих матриц играет важную роль в анализе и планировании экономических процессов.

1. Матрица материалоёмкости – это набор коэффициентов прямых материальных затрат

$$A(t) = \{a_{ij}(t)\}, \quad i, j = 1, \dots, n.$$

2. Матрица фондоёмкостей – это коэффициенты среднегодовых потребностей в основных фондах на производство единицы продукции

$$F(t) = \{f_{ij}(t)\}, \quad i, j = 1, \dots, n,$$

где n – число фондосоздающих отраслей.

3. Матрица (столбец) трудоёмкости – это коэффициенты прямых затрат труда

$$l(t) = \{l_j(t)\}, \quad j = 1, \dots, n.$$

Как альтернатива традиционному подходу к управлению работой матрица трудоёмкости представляет собой инструмент, который позволяет более точно оценивать и учитывать факторы, влияющие на распределение трудовых ресурсов в процессе выполнения проекта.

Модели межотраслевого баланса представляют производственные капитальные вложения с помощью вектора переменных – каждый элемент соответствует определённому виду продукции, используемой как капиталовложения. Эти переменные отражают физическую структуру производственных фондов и включают индексы для детального описания состава капиталовложений.

В моделях МОБ выделяют структуру финансовых вложений на несложное и расширенное воспроизводство: первое означает замещение изношенных средств производства, второе – увеличение производственных мощностей для обеспечения роста.

Динамика финансовых вложений в этих моделях связана с процессом воспроизводства основных фондов, что позволяет анализировать и прогнозировать изменения в капитальных вложениях и их воздействие на секторы экономики. Финансовые вложения для несложного воспроизводства зависят от объёмов фондов и степени их физического и морального износа. Эти вложения могут быть примерно оценены с помощью следующего выражения [23]:

$$u_i^{\text{прот.}}(t) = \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}(t) \Phi_{ij}(t), \quad i = 1, \dots, n, \quad (20)$$

где $\gamma_{ij}(t)$ – доля расходов на замену изношенных основных фондов в структуре, относительный возраст фондов к объёму фондов;

$\Phi_{ij}(t)$ – объём основных фондов i -го вида, занятых в отрасли с номером j на начало года t .

Чтобы понять уровень зависимости (20), нужно учесть характер распределённых задержек инвестиций. Финансовые вложения в расширенное воспроизводство основных фондов основываются на прогнозах их будущего роста, а также на долевыми инвестициях и временных задержках вложений. Получаем выражение с учётом варианта с сосредоточенными лагами

$$u_i^{\text{расш.}}(t) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(t) \Delta \Phi_j(t + \tau_j), \quad i = 1, \dots, n, \quad (21)$$

где $b_{ij}(t) = \frac{\Delta \Phi_{ij}(t + \tau_j)}{\Delta \Phi_j(t + \tau_j)}$ – это затраты фонда i -го вида (количество i -й продукции) или капиталовложения, которые необходимы для увеличения единицы целевых фондов в отрасли. Следовательно, именно в данной формулировке параметр «фондоёмкость» $b_{ij}(t)$ определён как коэффициент прироста [24].

Получается следующая формула для капиталовложений при рассмотрении производственной мощности или прироста производства:

$$u_i^{\text{расш.}}(t) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(t) \Delta x_j(t + \tau_j), \quad i = 1, \dots, n. \quad (22)$$

Коэффициенты $b_{ij}(t)$ имеют разные значения и предназначены для разных расчётов в формулах (21) и (22). В формуле (21) они отражают материально-вещественную структуру финансовых вложений, используемых для создания новых активов, а в формуле (22) эти коэффициенты представляют удельные капиталовложения для достижения единицы производственной мощности или производства. Другими словами, в формуле (21) устанавливается соотношение между структурой финансирования и коэффициентами $b_{ij}(t)$, тогда как формула (22) определяет соотношение между производственными возможностями и коэффициентами $b_{ij}(t)$

$$b_{ij}(t) = \frac{\Delta \Phi_{ij}(t + \tau_j)}{\Delta x_j(t + \tau_j)}.$$

Предположение о том, что новые фонды увеличивают производственную мощность, приводит к объединению уравнений (21) и (22).

Выражения (21) и (22) позволяют новоиспечённым фондам учитывать инвестиционный лаг при определении своей стоимости. Это подчёркивает важность учёта временных аспектов и динамики в моделировании экономических процессов с использованием модели МОБ.

Получаем, что на самом деле

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(t) \Delta \Phi_j(t + \tau_j) = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta \Phi_{ij}(t + \tau_j)}{\Delta \Phi_j(t + \tau_j)} \Delta \Phi_j(t + \tau_j) = \Delta \Phi_i(t + \bar{\tau}_i),$$

а также

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(t) \Delta x_j(t + \tau_j) = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta \Phi_{ij}(t + \tau_j)}{\Delta x_j(t + \tau_j)} \Delta x_j(t + \tau_j) = \Delta \Phi_i(t + \bar{\tau}_i),$$

где $\bar{\tau}_i$ – средневзвешенный лаг для i -й отрасли, который можно оценить как время, необходимое для реконструкции типичного предприятия.

Важно было в моделировании учитывать временной лаг при анализе влияния капиталовложений на поступление основных и оборотных фондов или будущий производственный выпуск. Для начала можно использовать выражения (21) и (22). Контроль над инвестиционными лагами с помощью динамической модели МОБ всегда влиял на изменения отраслевых выпусков $x_i(t)$ во времени. Однако в балансовой модели этот контроль не зависит от значений элементов матриц A и B , определяющих поведение компонентов движения и качество переходных процессов в экономической системе [25].

Для углублённого понимания и улучшения СДС моделей, влияющих на состояние и тенденции макроэкономической системы, используют различные модели и соотношения. Их анализ даёт полное представление о механизмах функционирования экономики, помогает прогнозировать и управлять её развитием. Изучение таких инструментов и методов работы с ними необходимо для оптимизации экономических процессов.

В матричном виде модель записывается как

$$X = AX + \Delta\Phi + Y,$$

или с учётом соотношения $\Delta\Phi = B\Delta X$

$$X = AX + B\Delta X + Y,$$

где предельный переход приводит к формированию модели (2).

Статическую устойчивость линейных систем анализируют для замкнутых моделей, поэтому вектор потребления $Y(t)$ выражается через составляющие выпуска (см. [26] и текст данной работы между формулами (2) и (4)).

Затраты на труд можно включить в матрицу A , что позволяет закрыть модель и расширить её возможности:

$$X(t) = (A + Q)X(t) + B\dot{X}(t).$$

В настоящей работе впервые показано, что приростные фондоёмкости (капитальные коэффициенты), хотя и содержат важную информацию для анализа инвестиционно-фондового процесса, не имеют отношения к межотраслевому моделированию. В качестве B выступают не безразмерные фондоёмкости, а межотраслевые инерционности (измеряются в единицах времени). Это упрощает моделирование и повышает его научно-практическую объективность. Сказанное радикально меняет дело в сторону как упрощения процесса моделирования, так и научно-практической объективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оптимизации и управления экономикой необходим соответствующий математический инструментарий и современные управленческие подходы, обеспечивающие эффективное расходование ресурсов.

Динамические модели МОБ подходят для вариантных расчётов. Их применение позволяет:

- находить оптимальные пути развития в изменяющемся рынке через сравнительный анализ конкурентных стратегий;
- определять ключевые факторы структуры экономики путём расчётов с изменяемыми конфигурациями и уровнями агрегации;
- повышать точность результатов за счёт учёта статистических погрешностей в данных.

Качество статистики критически важно: проблемы с достоверностью данных (актуальные с 1930-х гг.) искажают представление об экономике и осложняют работу аналитиков. Улучшение системы сбора и обработки информации повысит точность прогнозов и эффективность управления.

Создание макросистемы для устойчивого роста валовых выпусков и инфраструктуры – важная задача. Достижение роста валового внутреннего производства требует чётких целей и гибких стратегий, учитывающих внешние факторы и глобальные изменения.

Таким образом, современное управление экономикой нуждается в чётких целях и инновационных подходах для адаптации к вызовам в быстро меняющейся среде.

Список источников

1. Almon, C. Inforum models: origin, evolution and byways avoided / C. Almon // Studies on Russian Economic Development. – 2016. – № 27 (2). – P. 119–126.
2. Широ́в, А. А. Интегрированный межотраслевой баланс как элемент анализа и прогнозирования связей на постсоветском пространстве / А. А. Широ́в, А. Р. Саяпова, А. А. Янговский // Проблемы прогнозирования. – 2015. – № 1. – С. 11–21.
3. Узьякова, Е. С. Анализ влияния научно-технического развития на экономический рост с использованием инструментария межотраслевого баланса / Е. С. Узьякова, Р. М. Узьяков // Проблемы прогнозирования. – 2018. – №6(171). – С. 82–92.
4. Узьяков, Р. М. Использование межотраслевого инструментария в анализе динамики российской экономики в 1991–2013 гг. / Р. М. Узьяков // Проблемы прогнозирования. – 2018. – № 3 (168). – С. 13–27.
5. Суворов, Н. В. Межотраслевой анализ взаимосвязи структурных изменений, эффективности внешне-экономических связей и масштабов инвестиционной деятельности в отечественной экономике / Н. В. Суворов, Е. Е. Балашова // Проблемы прогнозирования. – 2002. – № 5. – С. 48–63.
6. Суворов, Н. В. Балансовые и факторные модели как инструмент анализа и прогнозирования структуры экономики / Н. В. Суворов, С. В. Трещина, Ю. В. Белецкий, Е. Е. Балашова // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2017. – № 15. – С. 50–75.
7. Бузгалин, А. В. Глобальный капитал: Методология: По ту сторону позитивизма, постмодернизма и экономического империализма (Маркс re-loaded) / А. В. Бузгалин, А. И. Колганов. – 5-е изд. – Москва : ЛЕ-НАНД, 2022. – Т. 1. – 656 с.
8. Гранберг, А. Г. Василий Леонтьев в мировой и отечественной экономической науке / А. Г. Гранберг // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2006. – № 10 (3). – С. 471–492.
9. Гусев, М. С. Глобальные тенденции изменения структуры производства и доходов в мире и России / М. С. Гусев, А. А. Широ́в, Д. А. Ползиков, А. А. Янговский // Проблемы прогнозирования. – 2018. – № 6 (171). – С. 28–50.

10. Дегтярева, С. В. Становление институциональной системы экономики и институциональные изменения / С. В. Дегтярева // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Экономическая». – 2007. – № 31-1 (117). – С. 70–73.
11. Almon, C. Why are input-output tables important? / C. Almon // *Studies on Russian Economic Development*. – 2018. – № 29 (6). – P. 584–587.
12. Маслов, А. Ю. Построение системы симметричных таблиц «затраты-выпуск» / А. Ю. Маслов // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2004. – № 2. – С. 77–92.
13. Сулов, В. И. Агент-ориентированная многорегиональная модель «затраты-выпуск» российской экономики / В. И. Сулов, Д. А. Доможиров, Н. М. Ибрагимов, В. С. Костин, Л. В. Мельникова, А. А. Цыплаков // Экономика и математические методы. – 2016. – № 52 (1). – С. 112–131.
14. Сулов, В. И. Моделирование роли государства в пространственной агент-ориентированной модели / В. И. Сулов, Т. С. Новикова, А. А. Цыплаков // Экономика региона. – 2016. – № 12 (3). – С. 951–965.
15. Позамантир, Э. И. Вычислимое общее равновесие экономики и транспорта (Транспорт в динамическом межотраслевом балансе) / Э. И. Позамантир. – Москва : Поли Принт Сервис, 2014. – 141 с.
16. Леонтьев, В. В. Экономические эссе. Теории, исследования, факты и политика / В. В. Леонтьев. – Москва : Политиздат, 1990. – 415 с.
17. Торопцев, Е. Л. Прикладной анализ балансовых моделей В. Леонтьева / Е. Л. Торопцев, Т. Г. Гурнович. – Ставрополь : Ставроп. кн. изд-во, 1999. – 153 с.
18. Торопцев, Е. Л. Численный анализ высокоразмерных моделей экономической динамики / Е. Л. Торопцев, Т. Г. Гурнович, А. В. Гладилин // Вопросы статистики. – 1998. – № 8. – С. 32–34.
19. Гранберг, А. Г. Введение в системное моделирование народного хозяйства / А. Г. Гранберг, С. А. Суспицын. – Новосибирск : Наука, 1988. – 304 с.
20. Торопцев, Е. Л. Показатели собственных динамических свойств экономических систем / Е. Л. Торопцев, Н. Г. Гудиева // Высокопроизводительные вычисления для решения прикладных задач : X-я (67-я) ежегодная научно-практическая конференция студентов, преподавателей и молодых ученых Северо-Кавказского федерального университета, Ставрополь, Россия, 17–23 апреля, 2023, сборник трудов. – Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2023. – С. 160–163.
21. Волконский, В. А. Модель оптимального планирования и взаимосвязи экономических показателей / В. А. Волконский. – Москва : Наука, 1967. – 152 с.
22. Исаев, Б. Л. Интегрированные балансовые системы в анализе и планировании экономики / Б. Л. Исаев. – Москва : Наука, 1969. – 336 с.
23. Браверман, Э. М. Математические модели планирования и управления в экономических системах / Э. М. Браверман. – Москва : Наука, 1976. – 366 с.
24. Уилкинсон, Дж. Х. Алгебраическая проблема собственных значений / Дж. Х. Уилкинсон. – Москва : Наука, 1970. – 564 с.
25. Стоун, Р. Метод затраты-выпуск и национальные счета / Р. Стоун. – Москва : Статистика, 1964. – 205 с.
26. Олейник, А. Б. Экономическая устойчивость предприятия в современных условиях: специальность 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) : автореф. дис. ... канд. экон. наук / Андрей Борисович Олейник. – 2002. – 21 с.

References

1. Almon, C. Inforum models: origin, evolution and byways avoided. *Studies on Russian Economic Development*, 2016, no. 27 (2), pp. 119–126.
2. Shirov, A. A., Sayapova, A. R., Yantovsky, A. A. Integrated intersectoral balance as an element of analysis and forecasting of links in the post-Soviet space. *Problems of Forecasting*, 2015, no. 1, pp. 11–21 (In Russ.).
3. Uzyakova, E. S., Uzyakov, R. M. Analysis of the impact of scientific and technical development on economic growth using the tools of intersectoral balance. *Problems of Forecasting*, 2018, no. 6 (171), pp. 82–92 (In Russ.).
4. Uzyakov, R. M. The use of intersectoral tools in the analysis of the dynamics of the Russian economy in 1991–2013. *Problems of Forecasting*, 2018, no. 3 (168), pp. 13–27 (In Russ.).
5. Suvorov, N. V., Balashova, E. E. Intersectoral analysis of the interrelation between structural changes, the efficiency of foreign economic relations, and the scale of investment activity in the domestic economy. *Problems of Forecasting*, 2002, no. 5, pp. 48–63 (In Russ.).
6. Suvorov, N. V., Treshchina, S. V., Beletsky, Yu. V., Balashova, E. E. Balance and factor models as a tool for analysis and forecasting of the structure of the economy. *Scientific Works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences*, 2017, no. 15, pp. 50–75 (In Russ.).
7. Buzgalin, A. V., Kolganov, A. I. *Global capital: methodology: beyond positivism, postmodernism, and economic imperialism (Marx re-loaded)*. 5th ed. Moscow, LENAND Publ., 2022, vol. 1. 656 p. (In Russ.).
8. Granberg, A. G. Vasily Leontief in the world and domestic economic science. *Economic Journal of the Higher School of Economics*, 2006, no. 10 (3), pp. 471–492 (In Russ.).
9. Gusev, M. S., Shirov, A. A., Polzikov, D. A., Yantovsky, A. A. Global trends in the transformation of production and income structures in the world and in Russia. *Problems of Forecasting*, 2018, no. 6 (171), pp. 28–50 (In Russ.).
10. Degtyareva, S. V. Formation of the institutional system of the economy and institutional changes. *Scientific Works of Donetsk National Technical University. Economic Series*, 2007, no. 31–1 (117), pp. 70–73 (In Russ.).
11. Almon, C. Why are input-output tables important? *Studies on Russian Economic Development*, 2018, no. 29 (6), pp. 584–587.

12. Maslov, A. Yu. Construction of a system of symmetric Input-Output tables. *Scientific Works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences*, 2004, no. 2, pp. 77–92 (In Russ.).
13. Suslov, V. I., Domozhirev, D. A., Ibragimov, N. M., Kostin, V. S., Melnikova, L. V., Tsyplakov, A. A. Agent-oriented multi-regional input-output model of the Russian economy. *Economics and Mathematical Methods*, 2016, no. 52(1), pp. 112–131 (In Russ.).
14. Suslov, V. I., Novikova, T. S., Tsyplakov, A. A. Modeling the role of the state in a spatial agent-based model. *Economy of Region*, 2016, no. 12(3), pp. 951–965 (In Russ.).
15. Pozamantir, E. I. *Computable general equilibrium of economy and transport (transport in dynamic intersectoral balance)*. Moscow, Poli Print Service, 2014. 141 p. (In Russ.).
16. Leontief, V. V. *Economic essays. Theories, research, facts and politics*. Moscow, Politizdat Publ., 1990. 415 p. (In Russ.).
17. Toroptsev, E. L., Gurnovich, T. G. *Applied analysis of V. Leontief's balance models*. Stavropol, Stavropol Book Publishing House, 1999. 153 p. (In Russ.).
18. Toroptsev, E. L., Gurnovich, T. G., Gladilin, A. V. Numerical analysis of high-dimensional models of economic dynamics. *Voprosy Statistiki*, 1998, no. 8, pp. 32–34 (In Russ.).
19. Granberg, A. G., Suspitsyn, S. A. *Introduction to system modeling of the national economy*. Novosibirsk, Nauka, 1988. 304 p. (In Russ.).
20. Toroptsev, E. L., Gudieva, N. G. Indicators of the intrinsic dynamic properties of economic systems. *High-Performance Computing for Applied Problems: 10th (67th) Annual Scientific and Practical Conference of Students, Faculty, and Young Scientists of the North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia, April 17-23, 2023, Proceedings*. Stavropol, North Caucasus Federal University, 2023, pp. 160–163 (In Russ.).
21. Volkonsky, V. A. *Model of optimal planning and interrelations of economic indicators*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 152 p. (In Russ.).
22. Isaev, B. L. *Integrated balance systems in economic analysis and planning*. Moscow, Nauka Publ., 1969. 336 p. (In Russ.).
23. Braverman, E. M. *Mathematical models of planning and management in economic systems*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 366 p. (In Russ.).
24. Wilkinson, J. H. *The algebraic eigenvalue problem*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 564 p. (In Russ.).
25. Stone, R. *Input-Output method and national accounts*. Moscow, Statistika Publ., 1964. 205 p. (In Russ.).
26. Oleynik, A. B. *Economic stability of an enterprise in modern conditions: specialty 08.00.05 – Economics and management of the national economy (by industries and spheres of activity) : abstract of the dissertation for the degree of candidate of economic sciences*, 2002. 21 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 21.04.2026; одобрена после рецензирования 14.05.2026; принята к публикации 18.05.2026.

The article was submitted 21.04.2026; approved after reviewing 14.05.2026; accepted for publication 18.05.2026.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.382.2/.3-046.47

ОЦЕНКА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОТВОДОВ ИЗ АРСЕНИДА БОРА МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ

Вершинин Егор Андреевич, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, корпус 3,
аспирант, ORCID: 0009-0001-6173-7749, e-mail: egor.vershinin2011@yandex.ru

В данной работе представлена расчётно-экспериментальная оценка теплоотводящих материалов из арсенида бора с использованием численного моделирования, а также сравнительный анализ теоретических и практических характеристик теплопроводности материала. Целью исследования является сопоставление расчётных и экспериментальных данных теплоотводящих элементов из арсенида бора для обеспечения стабильного температурного режима информационно-измерительных систем, а также повышения их надёжности и стойкости при поддержании нормализованного теплового состояния. Проведён анализ существующих значений теплопроводности для теплоотводов из арсенида бора на основе как теоретических, так и экспериментальных данных с учётом его физических свойств, и создана имитационная модель теплоотводящей системы, в которой были учтены ключевые свойства арсенида бора: высокая теплопроводность, низкая плотность, а также проведено численное моделирование системы теплоотводов с различными теплопроводными характеристиками.

Ключевые слова: теплоотвод, тепловой режим, оценка, информационно-измерительная система, арсенид бора, расчёт, теплопроводность

A SCIENTIFIC APPROACH TO METHODOLOGICAL AND SOFTWARE ASSURANCE OF THE RELIABILITY OF COMPUTING SYSTEMS AND THEIR ELEMENTS USING BORON ARSENIDE HEAT SINKS

Vershinin Egor A., Penza State University, Russian Federation, bld. 3, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation,
graduate student, ORCID: 0009-0001-6173-7749, e-mail: egor.vershinin2011@yandex.ru

In this work estimated and experimental assessment of heat-removing materials from pine forest arsenide with use of computational modeling and also contrastive analysis of theoretical and practical characteristics of heat conductivity of material is presented. A research objective is comparison of calculated and experimental data of heat-removing elements from pine forest arsenide for providing stable temperature condition of information measuring systems and also increase in their reliability and firmness at maintenance of the normalized thermal status. The analysis of the existing values of heat conductivity for heat sinks from pine forest arsenide on a basis of both theoretical, and experimental data taking into account its physical properties is carried out and the simulation model of a heat-removing system in which key properties of arsenide of a pine forest were considered is created: high heat conductivity, low density and also computational modeling of a system of heat sinks with different heat-conducting characteristics is carried out.

Keywords: thermal regime, assessment, information measuring system, pine forest arsenide, calculation, thermal conductivity

ВВЕДЕНИЕ

Современная радиоэлектронная аппаратура часто сталкивается с проблемами поддержания требуемого теплового режима. Это обусловлено как миниатюризацией компонентов, так и увеличением рассеиваемой мощности. Традиционные материалы, такие как медь и алюминий, обладают высокой теплопроводностью, однако их применение ограничивается требованиями к массе и габаритам конструкции [9, 10]. В последние годы начинают внедряться новые материалы, обладающие высокой теплопроводностью при наименьшей массе и высокой теплопроводностью. Один из таких материалов является арсенид бора (BAs), который демонстрирует уникальные свойства, сравнимые с алмазом исходя из высоких значений теплопроводности и низких значений плотности [13].

Одним из наиболее перспективных материалов в данной области является арсенид бора (BAs). Его теплопроводность достигает около 1300 Вт/(м·К), что делает его востребованным в радиоэлек-

тронных системах и космических аппаратах [7, 11]. Однако для точной оценки характеристик теплопроводности необходимо учитывать ряд факторов, включая граничные условия и температурную зависимость [1–3].

Расчётно-экспериментальный метод позволяет не только определять точные параметры теплопроводности, но и адаптировать материал к специфическим условиям эксплуатации. Среди методов измерения теплопроводности существуют стационарные методы (абсолютный метод с использованием радиационных экранов, радиальный метод, сравнительный метод) и нестационарные (метод лазерной вспышки). Настоящее исследование направлено на разработку методики оценки теплопроводности арсенида бора и последующую оптимизацию тепловых режимов радиоэлектронных и вычислительных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе используется расчётно-экспериментальный метод для анализа теплоотводящих свойств арсенида бора. Оценка теплопроводности выполняется путём сравнения теоретических расчётов с экспериментальными данными, полученными в ходе численного моделирования. Теоретическое значение теплопроводности рассчитывается для различных температурных режимов, что позволяет создать основу для дальнейших сравнений.

Основой для анализа служит уравнение теплопроводности и закон Фурье:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dS dt, \quad (1)$$

где dQ – тепловой поток, Вт/с;

dS – площадь поперечного сечения, м²;

$\frac{\partial T}{\partial x}$ – градиент температуры, град/м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град).

Выбор метода определения теплопроводности обусловлен спецификой экспериментальной задачи. В случае анализа арсенида бора на основе теоретических аспектов применяется метод пластины [4–6].

Для экспериментальной оценки используется нестационарный метод, а именно метод лазерной вспышки. Этот метод не относится к числу прямых способов измерения коэффициента теплопроводности [22–24]. При использовании данного метода определение теплопроводности производится при помощи трёх параметров, которые связаны с теплопроводностью следующим соотношением:

$$\lambda = \alpha \cdot c_p \cdot \rho, \quad (2)$$

где α – температуропроводность, м²/с;

c_p – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·град);

ρ – плотность, кг/м³.

Для определения коэффициента температуропроводности измеряемый образец в ходе проведения эксперимента облучается высокоинтенсивным коротким импульсом лучистой энергии, согласно рисунку 1 [20, 21]. Энергия импульса поглощается фронтальной поверхностью образца. Вызванный импульсом подъём температуры на обратной стороне образца записывается в виде термограммы. Испытания проводят на установке Linseis XFA 500 [5].

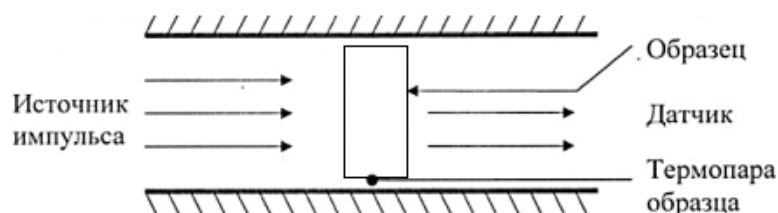


Рисунок 1 – Схема принципа измерения образца

При применении метода лазерной вспышки на точность измерений коэффициентов температуропроводности и теплопроводности могут влиять различные механизмы теплопередачи. В частности, неопределённость в результаты вносят процессы конвекционного и лучистого теплообмена между образцом и окружающей средой [17–19].

Исходя из рисунка 2, на основе полученных данных значение коэффициента теплопроводности для арсенида бора при повышенной рабочей температуре плюс 40 °С теоретическое значение составило 1256 Вт/(м·К), экспериментальное – 1143 Вт/(м·К).

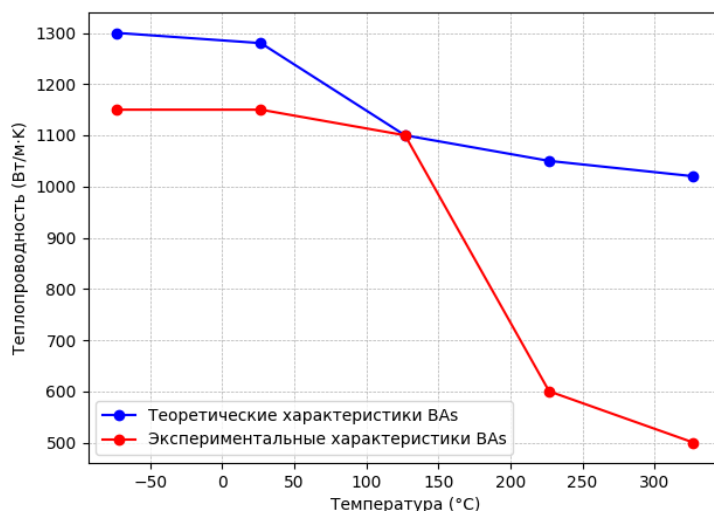


Рисунок 2 – Теоретические и экспериментальные характеристики значений теплопроводности BA [1–3]

После получения всех значений теплопроводности арсенида бора было проведено численное моделирование теплового режима на основе процессорного модуля, используемого в аппаратуре специального назначения.

На рисунке 3 продемонстрировано сечение конструкции и размещение элементов RK3568J и RK809-5 в программной среде ANSYS 20.0, модуле Iserpak [8, 14, 15]. Теплоотводящие элементы из арсенида бора закреплены на алюминиевой крышке корпуса, обеспечивая плотное прилегание к её поверхности [25]. Для эффективного теплообмена между компонентами и теплоотводом используется термопрокладка КПТД 2М/3 толщиной 1 мм.

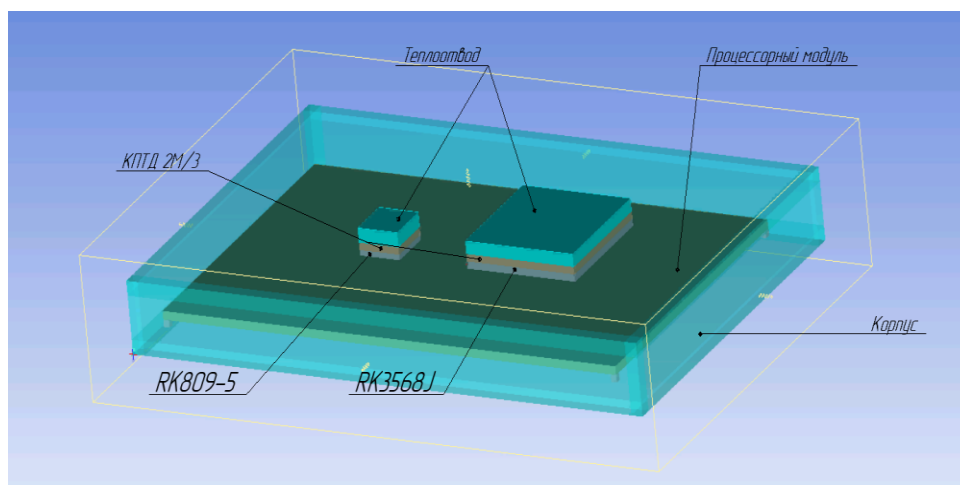


Рисунок 3 – Сечение устройства с процессорным модулем

Моделирование осуществляется для устройства, имеющего алюминиевый корпус. В его конструкции предусмотрена горизонтальная установка процессорного модуля АТБ-RK3568J, размеры которого составляют $82 \times 50 \times 6,4$ мм. В сборе с корпусом устройства его габариты достигают $90 \times 60 \times 10$ мм.

Корпус устройства выполнен герметичным, а теплоотвод обеспечивается за счёт естественной конвекции. Режим движения подвижной среды ламинарный. Рабочая температура окружающей среды для модуля составляет плюс 40°C при нормальном (атмосферном) давлении. Среднее допустимое значение температуры воздуха внутри прибора определяется минимальным значением предельной рабочей температуры электронных компонентов, используемых в системе, и составляет плюс 80°C .

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Расчёт теплового режима устройства проводился по ОСТ4 ГО.012.032, ОСТ4 ГО.012.014. При расчёте использовалось программное обеспечение ANSYS 20.0 модуль Iserpak. В основе тепловых расчётов лежат математические законы, описывающие тепловые процессы [8, 12, 15]. Основными уравнениями для описания тепловых процессов являются уравнение теплопроводности (3):

$$\frac{du}{dt} - a^2 \Delta T = f(r, t), \quad (3)$$

где T – температура, °C;

a – температуропроводность, м²/с;

Δu – оператор Лапласа;

$f(r, t)$ – функция внутреннего источника тепла (Вт/м³),

и уравнение Навье – Стокса (4) для описания конвекции:

$$\frac{d\vec{\vartheta}}{dt} = -\vec{g} \cdot (\nabla \vec{\vartheta}) + V \Delta \vec{\vartheta} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (4)$$

где $\vec{\vartheta}$ – вектор скорости воздуха, м/с;

$\vec{g}$ – ускорение свободного падения, м/с²;

V – кинематическая вязкость, м²/с;

∇p – градиент давления, Па/м;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

$\vec{f}$ – внешние силы,

а также уравнение теплопереноса (5):

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\vartheta} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q, \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

T – температура, °C;

$\vec{\vartheta}$ – вектор скорости воздуха, м/с;

λ – коэффициент теплопроводности среды;

q – мощность выделения источников тепла, Вт/м³.

Естественная конвекция реализована за счёт включения гравитационного поля и учёта плотности воздуха. В программном обеспечении было реализовано совместное решение уравнений движения воздуха и теплопереноса.

Граничные условия для стационарной задачи будут задаваться распределением температур на границе, в нашем случае температура будет постоянной по всей границе области расчёта (6)–(8):

1) температура:

$$T = 40 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (6)$$

2) условия прилипания для вектора скорости:

$$\vec{\vartheta} = 0; \quad (7)$$

3) условия для давления:

$$p = p_{\text{атм}}. \quad (8)$$

Для точного численного моделирования необходимо задать теплофизические свойства всех используемых материалов в расчёте, которые описаны в таблице 1.

Таблица 1 – Теплофизические свойства используемых материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·град)	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·град)
Арсенид бора	1256 ¹⁾ 1143 ²⁾	2250	570
Алюминий	237	2700	900
1	2	3	4
Воздух	0,026	1,184	1005
Термопрокладка КПТД 2М/3	1,4	1800	–

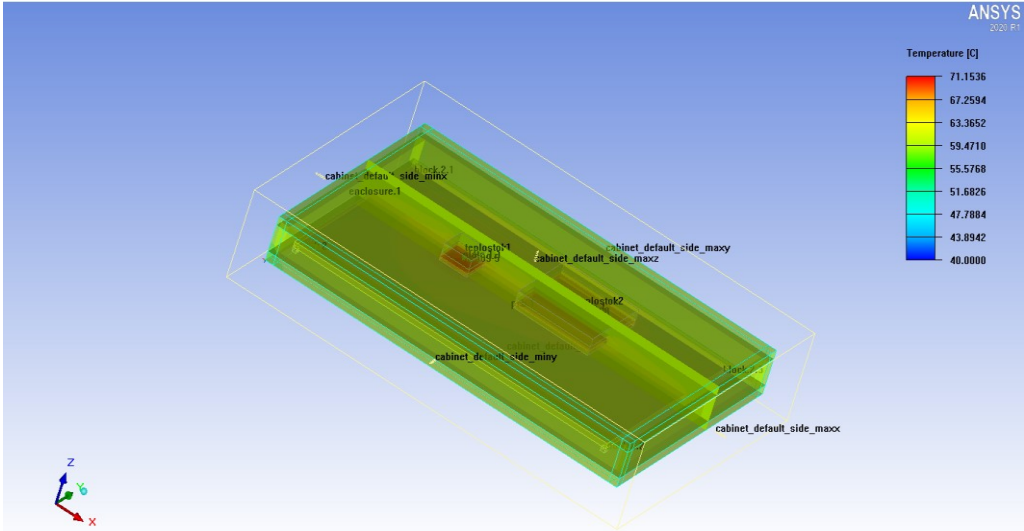
Примечание: 1) теоретическое значение теплопроводности; 2) экспериментальное значение теплопроводности.

Анализ теплового режима выполнен с учётом длительной работы устройства (более 8 часов) в составе объекта [8]. В таблице 2 [14] представлены результаты расчёта среднеобъёмной температуры воздуха внутри устройства, а также температур корпуса и кристалла электрорадиоэлемента (ЭРЭ) в сравнении с предельно допустимыми значениями, установленными техническими условиями.

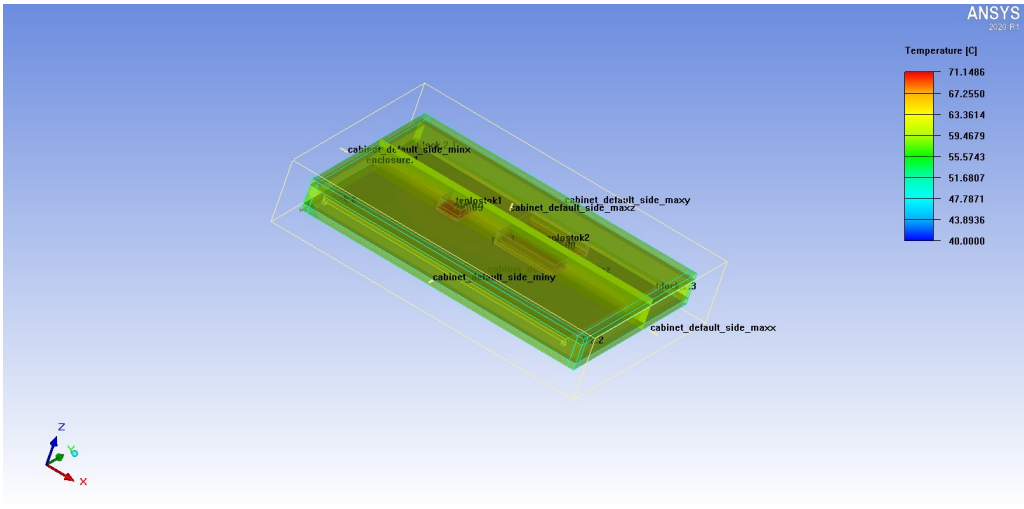
Таблица 2 – Результаты расчёта тепловых режимов с различными материалами

Теплопроводность, Вт/(м·К)	Наименование	Потребляемая (рассеиваемая) мощность, Вт	Результаты расчёта температуры воздуха (корпуса) кристалла*, °С	Допустимая по ТУ температура воздуха (корпуса) кристалла*, °С
$\lambda = 1256$	Модуль:	5	61,3	80
	RK3568J	2,5	63,8 (64,8) 66,9*	80 125*
	RK809-5	1	63,5 (68,7) 75,1*	125*
$\lambda = 1143$	Модуль:	5	61,2	80
	RK3568J	2,5	63,7 (64,7) 66,8*	80 125*
	RK809-5	1	63,4 (68,6) 75,1*	125*

Проведённое моделирование теплового состояния процессорного модуля показало, что уровень среднеобъёмной температуры перегрева остаётся в рамках, предусмотренных техническими условиями. Детальный анализ термических характеристик подтвердил соответствие устройства допустимым нормам, обеспечивая его надёжную и стабильную работу при заданных эксплуатационных параметрах [16]. Температурные поля исследуемой области представлены на рисунке 4



а)



б)

Рисунок 4 – Результаты расчёта тепловых режимов с различными значениями теплопроводности: а) теоретическое; б) экспериментальное

Анализ расчётных данных теплового режима показывает, что исследуемый материал с теоретическими и экспериментальными значениями теплопроводности не оказывает значительного влияния на конечные результаты. Это позволяет использовать любые из полученных значений при численном моделировании при рабочей температуре плюс 40 °С. Отклонение расчётных параметров составляет менее 1 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ теплопроводности арсенида бора, основанный на расчётно-экспериментальном подходе, показал, что теоретическое значение коэффициента теплопроводности составляет 1256 Вт/(м·К), тогда как экспериментально полученное значение равно 1143 Вт/(м·К). Различие между расчётными и экспериментальными данными теплопроводности не превышает 11 %, что свидетельствует о высокой точности используемой модели. Данные результаты продемонстрировали возможность заменить экспериментальные зависимости расчётными методиками для арсенида бора.

Полученные результаты подтверждают, что теоретическая оценка теплопроводности арсенида бора является достаточно надёжной для проектирования теплоотводящих систем без необходимости предварительных испытаний и дополнительных экспериментальных исследований. Таким образом, применение численных методов и аналитических расчётов значительно ускоряет процесс разработки, обеспечивая при этом высокую точность и достоверность результатов.

Следовательно, в данном случае экспериментальная проверка не является обязательной, поскольку теоретические расчёты обеспечивают достаточный уровень точности для практического использования арсенида бора в системах теплоотведения.

Список источников

1. Chen, X. Thermal Expansion Coefficient and Lattice Anharmonicity of Cubic Boron Arsenide / X. Chen, S. Sullivan, J. Zhou [et al.] // *Physical Review Applied*. – 2019. – Vol. 11, № 6. – P. 064070.
2. Feng, T. Four-phonon scattering reduces intrinsic thermal conductivity of graphene and the contributions from flexural phonons / T. Feng, X. Ruan // *Physical Review B*. – 2018. – Vol. 97, № 4. – P. 045202.
3. Ren, Z. High thermal conductivity in boron arsenide single crystals / Z. Ren // *Universal Journal of Non-linear Mechanics*. – 2022. – Vol. 10. – P. 27–33.
4. Асач, А. В. Методы исследования теплопроводности, электропроводности и коэффициента Зеебека / А. В. Асач, А. В. Новотельнова, А. С. Тукмакова, К. Л. Самусевич. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2019. – 21 с.
5. Платунов, Е. С. Теплофизические измерения : учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин ; под ред. Е. С. Платунова. – Санкт-Петербург : СПбГУНИИПТ, 2010. – 738 с.
6. Новиков, И. И. Основы ядерной энергетики. Прикладная термодинамика и теплопередача / И. И. Новиков, К. Д. Воскресенский. – Москва : Госатомиздат, 1961. – 548 с.
7. Юрков, Н. К. Оптимизация тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с помощью теплоотвода из арсенида бора / Н. К. Юрков, И. М. Рыбаков, Е. А. Вершинин // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2024. – № 3 (71). – С. 64–77.
8. Басов К. А. ANSYS и LMSVirtualLab. Геометрическое моделирование / К. А. Басов – Москва : ДМК Пресс, 2006. – С. 240.
9. Горячев, Н. В. Исследование тепловых режимов радиоэлектронных средств / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, Петрянин Д.Л., И. Д. Граб, П. Г. Андреев // Ульяновский центр трансфера технологий : сборник аннотаций проектов Молодёжного инновационного форума Приволжского федерального округа. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 96–98.
10. Дульнев, Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учебник для вузов по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры» / Г. Н. Дульнев. – Москва : Высш. шк., 1984. – 247 с.
11. Арсенид бора – справочник химика. – URL: <https://chem21.info/info/553576> (дата обращения: 02.04.25)
12. Горячев, Н. В. Методика однокритериального выбора теплоотвода дискретного теплонагруженного электрорадиоизделия / Н. В. Горячев, И. М. Рыбаков Н. К. Юрков // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018) : сборник докладов. – 2018. – Т. 1. – С. 397–400.
13. Алдонин, Г. М. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств / Г. М. Алдонин, А. М. Алешечкин, М. М. Валиханов, С. П. Желудько, О. А. Тронин. – Красноярск : ИПЦ СФУ, 2011. 360 с.
14. ANSYS Costumer Portal. – URL: https://www.ansys.com/customer/content/documentation/127/adv_pcb.pdf (дата обращения: 31.03.2025).
15. Яновский, А. А. Математическое моделирование и разработка систем охлаждения процессоров персональных компьютеров / А. А. Яновский, Я. В. Каныгин // *Международный студенческий научный вестник*. – 2015. – № 3–4. – С. 496–498.
16. Иофин, А. А. Конструктивные пути повышения надёжности бортовых радиоэлектронных систем / А. А. Иофин, А. С. Боков // *Надёжность и качество : труды Международного симпозиума*. – 2022. – Т. 1. – С. 44–49.
17. Kang, J. S. Experimental observation of high thermal conductivity in boron arsenide / J. S. Kang, M. Li, H. Wu, H. Nguyen, Y. Hu // *Science*. – 2018. – Vol. 361, № 6042. – P. 575–578.
18. Feng, T. Four-phonon scattering significantly reduces intrinsic thermal conductivity of solids / T. Feng, L. Lindsay, X. Ruan // *Phys. Rev. B* 96. – 2017. – Vol. 96 – P. 161201.
19. Lindsay, L. First-Principles Determination of Ultrahigh Thermal Conductivity of Boron Arsenide: A Competitor for Diamond? / L. Lindsay, D. A. Broido, T. L. Reinecke // *Physical Review Letters*. – 2013. – Vol. 111, issue 2. – P. 025901.
20. Новотельнова, А. В. Лаборатория исследования свойств термоэлектрических материалов / А. В. Новотельнова, А. В. Асач // *Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: материалы VI Международной научно-технической конференции*. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО. – 2013. – С. 206–208.

21. Платунов Е.С., Баранов И.В., Буравой С.Е., Курепин В.В. Теплофизические измерения : учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В., Баранов, С. Е.Буравой, В. В. Курепин ; под ред. Е. С. Платунова – Санкт-Петербург : СПбГУНИИПТ, 2010. – 738 с.
22. Теплофизика. Часть 2. Методы исследования тепловых характеристик веществ : учеб. пособие / Г. П. Николаев, А. Э. Лойко, А. В. Гоглачев [и др.]. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2010. – 103 с.
23. Миснар, А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар. – Москва : Мир, 1968. – 463 с.
24. Чудновский, А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский. – Москва : ФИЗМАТГИЗ, 1962. – 465 с.
25. Кошкин, В. К. Тепловые аппараты и теплоносители. Теория и расчет / В. К. Кошкин. – Москва : Машиностроение, 1971. – 198 с.

References

1. Chen, X. et al. Thermal Expansion Coefficient and Lattice Anharmonicity of Cubic Boron Arsenide. *Physical Review Applied*, 2019, vol. 11, no. 6, p. 064070.
2. Feng, T. Four-phonon scattering reduces intrinsic thermal conductivity of graphene and the contributions from flexural phonons. *Physical Review B*, 2018, vol. 97, no. 4, p. 045202.
3. Ren, Z. High thermal conductivity in boron arsenide single crystals. *Universal Journal of Non-linear Mechanics* 10, 2022, pp. 27–33.
4. Asach, A. V., Novotelnova, A. V., Tukmakova, A. S. et al. *Methods for studying thermal conductivity, electrical conductivity and Seebeck coefficient*. Saint Petersburg, Universitet ITMO, 2019. 21 p. (In Russ.).
5. Platonov, E. S., Baranov, I. V., Buravoy, S. E. et al. *Thermophysical measurements : textbook*. Saint Petersburg, SPbGUNIPT, 2010. 738 p. (In Russ.).
6. Novikov, I. I., Voskresenskii, K. D. *Fundamentals of nuclear energy. Applied thermodynamics and heat transfer*. Moscow, Gosatomizdat, 1961. 548 p. (In Russ.).
7. Yurkov, N. K., Rybakov, I. M., Vershinin, E. A. Optimization of thermal system of electronic equipment using boron arsenide heat sink. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences*, 2024, no. 3 (71), pp. 64–77 (In Russ.).
8. Basov, K. A. *ANSYS and LMSVirtualLab. Geometric modeling*. Moscow, DMK Press, 2006. 240 p. (In Russ.).
9. Goryachev, N. V., Lysenko, A. V., Petryanin, D. L. et al. Research of thermal regimes of electronic equipment. *Ulyanovsk Technology Transfer Center : collection of project abstracts from the Youth Innovation Forum of the Volga Federal District*. Ulyanovsk, UIGTU, 2009, pp. 96–98 (In Russ.).
10. Dulnev, G. N. *Heat and mass transfer in electronic equipment : textbook for universities in specialty "Design and production of electronic equipment"*. Moscow, Vysshaya shkola, 1984. 247 p. (In Russ.).
11. *Boron arsenide – chemist's handbook*. Available at: <https://chem21.info/info/553576> (accessed 02.04.2025) (In Russ.).
12. Goryachev, N. V., Rybakov, I. M., Yurkov, N. K. Methodology for single-criterion selection of heat sink for discrete heat-loaded electronic component. *XXI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM-2018): Proceedings*, 2018, vol. 1, pp. 397–400 (In Russ.).
13. Aldonin, G. M., Aleshechkin, A. M., Valikhanov, M. M. et al. *Fundamentals of design and technology of electronic equipment*. Krasnoyarsk, IPC SFU, 2011. 360 p. (In Russ.).
14. *ANSYS Costumer Portal*. Available at: https://www.ansys.com/customer/content/documentation/127/adv_pcb.pdf (accessed 31.03.2025) (In Russ.).
15. Yanovskiy, A. A., Kanygin, Ya. V. Mathematical modeling and development of personal computer processor cooling systems. *International Student Scientific Bulletin*, 2015, no. 3–4, pp. 496–498 (In Russ.).
16. Iofin, A. A., Bokov, A. S. Structural methods for improving reliability of onboard electronic systems. *Reliability and quality: proceedings of the international symposium*, 2022, vol. 1, pp. 44–49 (In Russ.).
17. Kang, J. S. et al. Experimental observation of high thermal conductivity in boron arsenide. *Science*, 2018, vol. 361, no. 6042, pp. 575–578.
18. Feng, T. et al. Four-phonon scattering significantly reduces intrinsic thermal conductivity of solids. *Phys. Rev. B* 96, 2017, vol. 96, p. 161201.
19. Lindsay, L. et al. First-Principles Determination of Ultrahigh Thermal Conductivity of Boron Arsenide: A Competitor for Diamond? *Physical Review Letters*, 2013, vol. 111, issue 2, p. 025901 (In Russ.).
20. Novotelnova, A. V., Asach, A. V. Laboratory for research of thermoelectric materials properties. *Low-temperature and food technologies in the 21st century : proceedings of the VI international scientific and technical conference*. Saint Petersburg, NRU ITMO, 2013, pp. 206–208 (In Russ.).
21. Platonov, E. S., Baranov, I. V., Buravoy, S. E. et al. *Thermophysical measurements : textbook*. Saint Petersburg, SPbGUNIPT, 2010. 738 p. (In Russ.).
22. Nikolaev, G. P., Loyko, A. E., Gogachev, A. V. et al. *Thermophysics. Part 2. Methods for studying thermal characteristics of substances : textbook*. Ekaterinburg, UGTU–UPI, 2010. 103 p. (In Russ.).
23. Missnar, A. *Thermal conductivity of solids, liquids, gases and their compositions*. Moscow, Mir Publ., 1968. 463 p. (In Russ.).
24. Chudnovskiy, A. F. *Thermophysical characteristics of dispersed materials*. Moscow, FIZMATGIZ, 1962. 465 p. (In Russ.).
25. Koshkin, V. K. *Thermal apparatus and heat carriers. Theory and calculation*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 198 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 25.02.2026; одобрена после рецензирования 01.04.2026; принята к публикации 05.05.2026.

The article was submitted 25.02.2026; approved after reviewing 01.04.2026; accepted for publication 05.05.2026.

УДК 615.841

DOI 10.54398/2074-1707.2026.74.2.011

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПРОТОТИП ДВУХКАНАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ
ДЛЯ ФИЗИОТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Солодовников Никита Сергеевич, Кубанский государственный университет, 350040, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149,
магистрант, ORCID: 0009-0004-7231-0961, e-mail: solodovnikovNikita@rambler.ru

В статье представлено структурное и функциональное описание спроектированной двухканальной DDS-системы генерации сигналов с программным независимым управлением частотой, фазой, амплитудой и синхронным переключением формы сигнала. В конце статьи приведено изображение уже собранной системы. Цель работы заключалась в создании универсальной платформы, способной генерировать сигналы сложной формы с независимым управлением частотой (0–40 МГц, дискретность – 0,04 Гц), фазой (шаг 11,25°) и амплитудой (шаг 0,02 В) по двум каналам, сигналы с амплитудной модуляцией и биполярные импульсы. Основная проблема, которую должен решить этот проект, – отсутствие современного, универсального, доступного, программируемого базового модуля для разработки физиотерапевтического медицинского оборудования, а также для проведения экспериментов с характеристиками сигналов в таких применяемых терапиях, как интерференц-терапия, УВЧ-терапия, чрескожная электронейростимуляция, индуктотермия. Данная работа написана об устройстве, которое будет объединять в себе, коммутацию трёх форм сигналов, адаптивный шаг частоты и управление с помощью микроконтроллера, аппаратную компенсацию падения амплитуды сигнала. Разработка отечественного модуля подобного назначения в России не ведется. Реализована экспериментальная система на базе доступных электронных модулей, таких как: два цифровых синтезатора AD9851 и один AD9833 под управлением микроконтроллера Arduino. В ходе написания статьи был собран прототип, написана программа для интерфейса управления для изменения показателей и их индикации. Экспериментальная система может быть интересна учёным, научным сотрудникам, изучающим вопросы реакции и поведения тканей и клеток человеческого организма, изменение их показателей при воздействии на них электрическими сигналами с разными физическими характеристиками.

Ключевые слова: двухканальная DDS-система, физиотерапия, универсальная платформа, AD9851, AD9833, чрескожная электронейростимуляция, цифровые потенциометры, H-мост

**EXPERIMENTAL PROTOTYPE OF A TWO-CHANNEL SIGNAL GENERATOR
FOR PHYSIOTHERAPY RESEARCH**

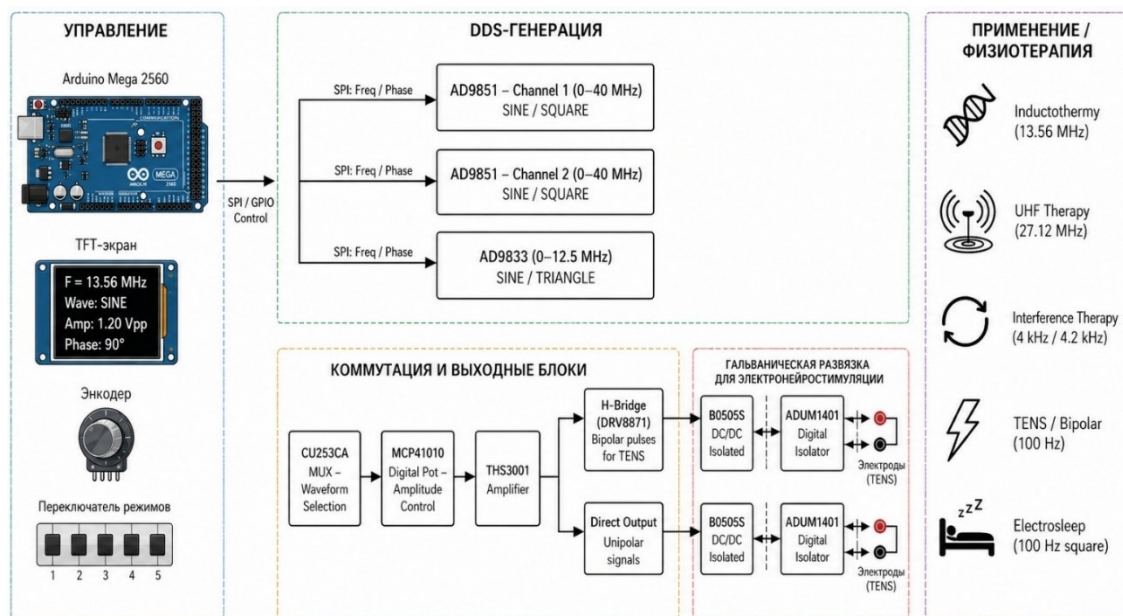
Solodovnikov Nikita S., Kuban State University, 149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russian Federation,

Master's student, ORCID: 0009-0004-7231-0961, e-mail: solodovnikovNikita@rambler.ru

This article presents a structural and functional description of a designed dual-channel DDS signal generation system with software-controlled independent control of frequency, phase, amplitude, and synchronous waveform switching. An image of the assembled system is provided at the end of the article. The aim of the work was to create a universal platform capable of generating complex waveforms with independent control of frequency (0–40 MHz, 0.04 Hz resolution), phase (11.25° step), and amplitude (0.02 V step) over two channels, as well as amplitude-modulated signals and bipolar pulses. The main problem this project aims to solve is the lack of a modern, universal, affordable, programmable base module for developing physiotherapeutic medical equipment, as well as for conducting experiments with signal characteristics in such therapies as interference therapy, UHF therapy, transcutaneous electrical nerve stimulation, and inductothermy. This paper describes a device that combines switching of three signal waveforms, adaptive frequency stepping, microcontroller control, and hardware compensation for signal amplitude drop. Development of a domestic module for this purpose is not currently underway in Russia. An experimental system was implemented using readily available electronic modules, including two AD9851 and one AD9833 digital synthesizers controlled by an Arduino microcontroller. During the course of writing this paper, a prototype was assembled, and a program for the control interface was written for changing and displaying parameters. This experimental system may be of interest to scientists and researchers studying the response and behavior of human tissues and cells, as well as changes in their parameters, when exposed to electrical signals with different physical characteristics.

Keywords: Dual-channel DDS system, physiotherapy, universal platform, AD9851, AD9833, transcutaneous electrical nerve stimulation, digital potentiometers, H-bridge

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в физиотерапии варианты применения высокочастотных и низкочастотных сигналов можно найти самые разные. В лечении и реабилитации пациентов после многих заболеваний играют большую роль генерируемые импульсные токи (диадинамические, синусоидальные модулированные, интерференционные и др.). Основная задача генерируемых сигналов в физиотерапевтических процедурах – раздражение нервно-мышечного аппарата, который, в свою очередь, чувствителен к импульсным токам. Ответной реакцией нервов и мышц служит их сокращение, сила сокращения зависит от амплитуды тока. Спазмолитический эффект появляется в случае воздействия на человеческий организм тока малой силы, в этом случае только миофибриллы вступают в ответную реакцию на внешнее раздражение. Чтобы запустить процессы микроциркуляции уже в отдельных мышечных волокнах, нужно подать ток средней величины. Для создания эффекта электростимуляции, который необходим для сокращения большого числа мышечных волокон, необходимо использовать сигнал с большой амплитудой [1]. В клинической терапии широко применяется диадинамотерапия, воздействие на организм импульсными токами полусинусоидальными частотой 50 и 100 Гц, которые, ритмически двигаясь, возбуждают кожные и мышечные афференты соматосенсорной системы. В практике использования данных процедур применим сигнал двухполупериодный непрерывный в виде синуса или однополупериодная непрерывная волна, которая может быть в исполнении как синуса, так и ниспадающего пилообразного сигнала. Первый тип процедуры обладает анальгетическим и вазоактивным действием, второй – вызывает эффект раздражения и миостимуляции [2]. Ещё более сильный эффект оказывает процедура с ритмическим однополупериодным сигналом, с полным расслаблением мышц в промежутках между их реакциями на раздражение. Соотношение пауз в секундах – один к одному либо 1,5 к 1,5 с.

В амплипульстерапии применяется амплитудно-модулированный переменный синусоидальный сигнал с основной несущей частотой 5 кГц, диапазон модулирования 50–150 Гц. В процедурах используют как режим с постоянной положительной составляющей, так и переменной, в обоих случаях сигналы генерируют электромагнитные колебания. Амплитуда тока не превышает 50 мА. Выделяются пять родов работы в процедурах амплипульстерапии: постоянная модуляция; сочетание «посылок» с модуляцией и пауз; сочетание сигналов с модуляцией и без, просто несущей частоты; сочетание «посылок» с постоянной модуляцией 150 Гц и с переменной модуляцией от 10–150 Гц; переменная частота модуляции от 10–150 Гц чередующаяся с паузами.

В современной физиотерапии применяют генерируемые сложные сигналы по двум независимым каналам в процедурах индуктотермии и интерференцтерапии. В первом случае основой для создания электромагнитного поля высокой частоты (стандартные частоты медицинские 13,56 МГц, 27,12 МГц) служит генерируемый сигнал, проходящий через согласующее сопротивление устройство и ВЧ-усилитель (10–100 Вт) в индуктор. Индуктотермия – это физиопроцедурный метод воздействия высокочастотным переменным магнитным полем. На практике индуктотермия – это

воздействие переменным магнитным полем высокой частоты на ткани организма [3]. При одновременной подаче в индуктор с двумя обмотками двух сигналов одинаковых по частоте, амплитуде, форме можно добиться усиления положительного эффекта ускорения сжатия и растяжения биотканей, а также перемещения ионов в тканях с удвоенной скоростью как самих таковых, так и изменения градиента направления действия поля. В интерференцтерапии применяется метод сложения двух сигналов в двух цепях, подводимых к организму. Диапазон частоты составляет 3–5 кГц, разница между сигналами около 200 Гц. Максимальная частота биения в этом случае 100 Гц, может варьироваться от 1 до 100 Гц. Сила тока составляет 50 мА [4].

В ультравысокочастотной терапии в неврологии используется сигнал с частотой 27,12 МГц и 39 МГц, процедура признана одной из наиболее эффективной в неврологии, так как ультравысокая частота хорошо поглощается нервными стволами и нейронами в центральной нервной системе и применяется при воспалительных процессах в активной фазе. Действующим фактором является электромагнитное поле, способное проникать в большую глубину тканей. Главный результат воздействия при ультравысокочастотной терапии – появление теплового эффекта, увеличивающего число функционирующих капилляров, и осцилляторного эффекта оказывает влияние на колебательные смещения макромолекул и диполей воды, что изменяет физико-химические свойства ткани [5].

Одним из доказанных методов купирования хронической боли является чрескожная электронейростимуляция, воздействие на рефлексогенные зоны и акупунктурные точки слабыми токами 200–400 мкА, частотой 10–200 Гц, форма сигнала зависит от изменения импеданса в подэлектродном участке [6]. Однако для процедуры необходимо динамическое изменение формы и амплитуды сигнала, чтобы уменьшить эффект привыкания у возбуждаемых тканей. Также стоит отметить, что чрескожная электронейростимуляция осуществляется биполярными сигналами [7].

Электросонотерапия как метод воздействия на центральную нервную систему – также достаточно распространённая процедура, в основе которой используется сигнал частотой 1–150 Гц с прямоугольной формой импульса, амплитудой 2–8 мА. Основной лечебный эффект терапии – транквилизация и седативность. В данной процедуре импульсные токи вызывают угнетение активности, усиление внутреннего торможения. Непосредственно путь, через который проходят сигналы, чтобы попасть к структурам головного мозга, лежит через отверстия глазниц. Импульсные токи воздействуют на сенсорные ядра черепно-мозговых нервов и гипногенные центры ствола внутри черепа.

Необходимо отметить несколько работ и статей по тематике разработки одноканальных и двухканальных генераторов для физиотерапии. В статье А. О. Синюхина и С. В. Орлова описана реализация генератора сигналов на базе STM32, H-моста, и в основе генерации сигнала лежит широтно-импульсная модуляция [8]. В работе система заточена под конкретную процедуру, а именно имплант, погружное устройство имеет один канал, и диапазон частоты ограничивается 5 кГц, однако стоит отметить, что авторы реализовали сложный алгоритм программного расчёта таблиц с данными периодических функций для построения прямоугольного, пилообразного и трапецевидного сигнала. Синусоидальная форма сигналов формируется путём передискретизации таблично заданной функции. Очевидно, что данной системе генерации сигналов недоступны частоты выше 5 кГц и нет никакой регулировки характеристик в реальном времени по фазе и частоте, отсутствует второй канал и такой генератор почти наверняка нельзя применить для лабораторных экспериментов в других процедурах физиотерапии кроме как электростимуляции. Современный аппарат «Электросон Supromed» узкоспециализирован под процедуру электросна, работает в низкочастотном диапазоне (10–160 Гц) [9]. Данный аппарат генерирует только прямоугольные импульсы, одноканальный и регулировка амплитуды в крайне маленьком диапазоне – от 0 до 10 мА, отсутствует механизм плавной регулировки частоты, вместо этого частота меняется дискретно с шагом в 10 Гц.

Разрабатываемый генератор способен формировать синусоидальные, прямоугольные и треугольные сигналы с частотой от единиц герц до десятков мегагерц, с возможностью амплитудной модуляции и генерации биполярных импульсов, и у неё также есть на выходе два независимых канала. Предлагаемая DDS-система впервые объединяет все перечисленные возможности в одной компактной платформе, заменяя 3–4 специализированных прибора.

ПОСТАНОВКА РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

В настоящее время в Российской Федерации отсутствует серийно выпускаемый универсальный программируемый генератор сигналов, предназначенный для физиотерапевтических исследований и разработки новых методик лечения. Существующие аппараты (например, «Электросон Supromed», «Амплипульс-5», «Интерстим», «УВЧ-30») являются узкоспециализированными: каждый из них работает в фиксированном частотном диапазоне, с одной-двумя формами сигнала и, как правило, с одним выходным каналом. Это не позволяет исследователям гибко менять параметры сигнала (частоту, форму, амплитуду, фазу, скважность) в реальном времени, что необходимо для изучения реакции биологических тканей на различные типы электрического воздействия. Таким

образом, проблема заключается в отсутствии доступной и гибкой платформы для генерации сигналов, которая могла бы стать базой для создания физиотерапевтических аппаратов нового поколения.

Актуальность темы. Актуальность работы обусловлена тремя факторами. Во-первых, в России и в мире есть спрос на физиотерапевтические процедуры (электросон, УВЧ-терапия, интерференцтерапия, чрескожная электронейростимуляция и др.), однако большая часть аппаратов морально устарела (разработана в 1970–1990-х гг.) и не позволяет реализовать современные методики с динамическим изменением параметров сигнала. Во-вторых, развитие персонализированной медицины требует возможности индивидуальной настройки частоты, формы и амплитуды сигнала под конкретного пациента, что невозможно на аппаратах с фиксированными дискретными значениями. В-третьих, отсутствие открытой экспериментальной платформы сдерживает научные исследования в области нейростимуляции, электроанальгезии и реабилитации, поскольку исследователи вынуждены либо использовать дорогостоящие импортные генераторы, либо собирать однозадачные схемы «с нуля». Разработка универсального модуля, способного генерировать синусоидальные, прямоугольные и треугольные сигналы в диапазоне от единиц герц до 40 МГц с независимым управлением по двум каналам, является своевременной и востребованной задачей.

Цель исследования. Целью работы является разработка и экспериментальная верификация двухканальной DDS-системы генерации сигналов на базе доступных компонентов (AD9851, AD9833, Arduino), обеспечивающей:

- 1) диапазон частот 0–40 МГц (синус) и 0–30 МГц (меандр, треугольник);
- 2) дискретность частоты 0,04 Гц и фазы 11,25°;
- 3) независимую настройку параметров по двум каналам;
- 4) возможность амплитудной модуляции и формирования биполярных импульсов;
- 5) синхронное переключение формы сигнала за время менее 10 мкс.

Достижение этой цели позволит создать открытую платформу для физиотерапевтических исследований, которая может служить заменой 3–4 узкоспециализированных приборов.

Задачи исследования. Разработка структурной и функциональной схемы двухканального DDS-генератора на основе трёх цифровых синтезаторов частот. AD9851 два модуля использовать для синуса и меандра, AD9833 формирует треугольный сигнал. Коммутация трёх форм сигналов происходит через каскад из двух мультиплексоров. Реализовать программное обеспечение для микроконтроллера Arduino, обеспечивающее управление частотой, фазой, амплитудой (через цифровые потенциометры) и переключение формы сигнала с помощью энкодера, TFT-экрана и переключателя режимов. Далее произвести сборку на макетной плате, включая Н-мост для формирования биполярных импульсов. Проверить работоспособность системы и зафиксировать экспериментальные измерения характеристик генерируемых сигналов с помощью осциллографа: проверить диапазон частот, дискретность, время переключения формы, стабильность амплитуды. Настроить систему для генерации сигналов с характеристиками согласно физиотерапевтическим методикам (индуктотермия, УВЧ, интерференцтерапия, ЧЭНС, электросон).

СТРУКТУРНОЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В основе устройства генерации сигналов разной формы, частоты, амплитуды находится цифровой синтезатор частот. Устройство генерирует аналоговый сигнал за счёт создания последовательности отсчётов в цифровой форме и последующего преобразования их с помощью ЦАП. DDS представляет собой цифровое программируемое устройство, обеспечивающее быстрое переключение частоты выходного сигнала, обладающее высоким разрешением и широким диапазоном по частоте [10]. Рассмотрим систему на примере AD9851. Основой DDS является кварцевый генератор, задающий тактовую частоту 180 МГц [11], от неё зависит максимальная частота на выходе генератора, а также высокопроизводительный 10-битный цифро-аналоговый преобразователь, задача которого строить ступенчатую синусоиду, которая после прохождения через LC-фильтр 7 порядка превращается в гладкий сигнал на выходах *Zout*. Для получения прямоугольного сигнала в основной микросхеме находится компаратор, на неинвертирующий вход которого приходит внутреннее опорное напряжение около 2,5 В, а на инвертирующий вход поступает синусоидальное напряжение от выхода ЦАП. В результате колебаний синуса относительно средней точки 2,5 В происходит переключение компаратора и смена логического нуля на единицу, или, наоборот, в результате сигнал в виде меандра отправляется сразу на выходы модуля, *Qout*. Отдельно, путём регулировки опорного напряжения ЦАП, можно независимо влиять на амплитуду сигнала синусоидального и на скважность прямоугольного участка, на соотношение горизонтальных участков [9]. Микроконтроллер системы управляет синтезатором 40-битными пакетами данных (32 бита – установка частоты, 5 бит – управление фазой, 1 бит – управление умножителем), которые считываются в цифровой вход данных, записываются временно в сдвиговый регистр и в момент изменения требований к частоте и фазе выходного сигнала перезаписываются в рабочий регистр. Если подать на вход *Vinh*-микросхемы напряжение в диапазоне от 0 до 1 В, будет изменяться коэффициент заполнения выходных сигналов.

Структурная схема биотехнической системы приведена на рисунке 1.

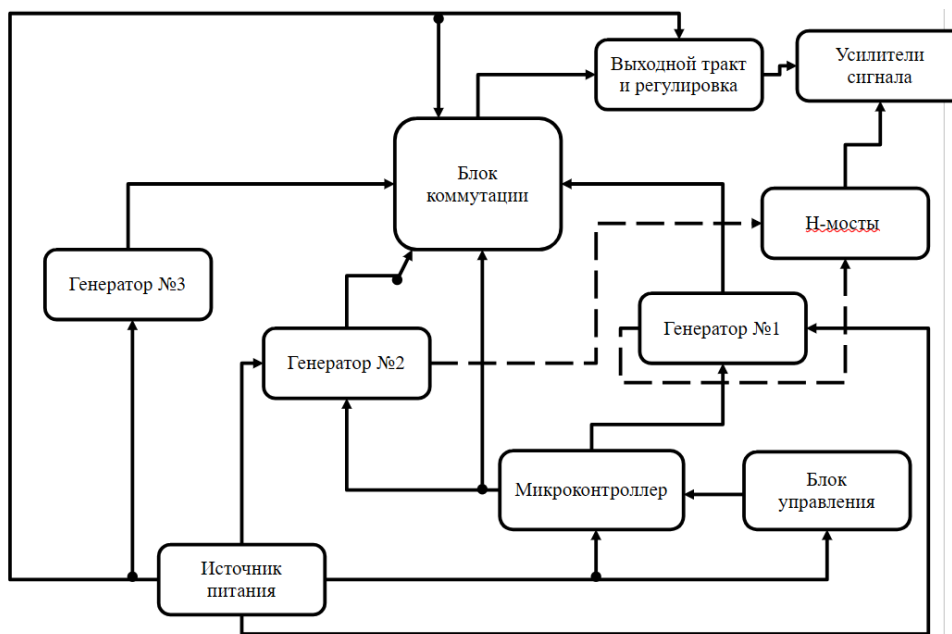


Рисунок 1 – Структурная схема биотехнической системы

Центральным управляющим элементом системы является микроконтроллер, который обеспечивает взаимодействие всех функциональных блоков и реализацию алгоритмов формирования выходных сигналов. Основу генерации составляют три независимых модуля – генератор № 1, генератор № 2, генератор № 3. Первые два модуля построены на базе микросхемы цифрового синтезатора частоты. AD9851 формируют синусоидальные и прямоугольные колебания в диапазоне до 40 МГц. AD9851 был выбран для схемы из-за высокой производительности, наличия встроенного умножителя частоты на 6, что позволяет достичь тактовой частоты 180 МГц и даёт возможность получить частотное разрешение до 0,04 Гц и генерировать сигналы в диапазоне до 40 МГц без использования внешних схем синтеза частоты. В работе [13] представлен экспериментальный макет радиоимпульсного стробоскопического преобразователя, в котором для формирования двух сигналов с близкими частотами (10,000 МГц и 10,010 МГц) используются два независимых генератора на базе AD9851 под управлением микроконтроллера ATmega16. Данное решение подтверждает эффективность использования пары AD9851 в системах, требующих независимой настройки частоты по двум каналам, что созвучно с задачами, решаемыми в настоящей работе [12]. Это свойство делает AD9851 предпочтительным выбором для построения прецизионных генераторов в задачах, требующих высокой точности, например, в медицинской технике. Генератор № 3 – модуль на микросхеме AD9833, основная задача которого в системе – генерировать сигнал треугольной формы. В данном модуле сигнал формируется прямо из фазового аккумулятора, 28-битного накапливающего сумматора, значение которого является фазой (от 0 до 2π). Фаза линейно преобразуется в амплитуду по формуле (1):

$$A(\varphi) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \varphi & \text{для } 0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2} \\ 2 - \frac{2}{\pi} \varphi & \text{для } \frac{\pi}{2} \leq \varphi < \frac{3\pi}{2} \\ \frac{2}{\pi} \varphi - 4 & \text{для } \frac{3\pi}{2} \leq \varphi < 2\pi \end{cases}, \quad (1)$$

где в первой четверти амплитуда ($0 \dots 90^\circ$) линейно растёт от 0 до максимума, во второй и третьей четвертях ($90 \dots 270^\circ$) амплитуда линейно падает от максимума до минимума, в четвёртой четверти ($270 \dots 360^\circ$) амплитуда линейно растёт от минимума до 0.

10-битное значение ($0 \dots 1023$) подаётся на ЦАП и на выходе строится ступенчатый треугольный сигнал, который на выходе сглаживается низкочастотным фильтром. Использование AD9833, который, как показано в литературе [13], успешно применяется в терапевтическом ультразвуковом оборудовании, позволяет разгрузить основные высокочастотные каналы и обеспечивает энергоэффективную генерацию сигналов в низкочастотном диапазоне.

Сформированные сигналы от трёх генераторов поступают в блок коммутации, построенный на мультиплексорах (CU253CA), которые под управлением микроконтроллера и механического переключателя обеспечивают выбор необходимой формы сигнала для каждого из двух выходных каналов

системы. Для обеспечения дополнительной функции получения на выходе устройства биполярных импульсов к отдельным выходам Qout2 подключены Н-мосты (DRV8871) напрямую в обход мультиплексоров. Данное архитектурное решение позволяет, подключая нагрузку между двумя выходами Н-моста и управляя направлением тока, формировать импульсы переменной полярности [14]. Далее сигналы направляются в выходной тракт, включающий усилители напряжения (THS3001) и схемы регулировки амплитуды, которые реализованы на цифровых потенциометрах [13] (MCP41010). Блок управления обеспечивает взаимодействие оператора с системой через энкодер и интерфейс, позволяет задавать частоту, фазу, форму и амплитуду сигналов по каждому каналу независимо. Питание всех компонентов системы осуществляется через стабилизированный источник питания, включающий DC-DC-преобразователи для получения необходимых напряжений (5 В для цифровой части и двухполярное питание ± 5 В (LM2662) для выходных усилителей). Такая архитектура обеспечивает гибкость настройки и возможность генерации сигналов сложной формы с независимым управлением параметрами по двум каналам, что является ключевым требованием для реализации цели статьи.

Для большей функциональности и вариантов экспериментов в биотехнической системе были применены два канала для генерации сигналов с возможностью независимого изменения их настроек. Поэтому в системе ключевую роль играют три модуля генераторов. В зависимости от количества цифровых входов на микроконтроллере можно подключить пины управления каждый отдельно или параллельно для генераторов AD9851 контакты *DATA*, *word load clock*, *RESET*. Нельзя поступить так же с *frequency update*, это ключевой пин для применения изменений для каждого отдельно генератора. Для того чтобы изменять форму сигнала на двух выходах уже всей схемы, сразу после генераторов стоят тройные двухканальные мультиплексоры. Это позволит в дальнейшем оператору или экспериментатору выбирать с помощью энкодера, механического переключателя или пользовательского сенсорного интерфейса, какую форму сигнала необходимо получить на выходе системы, так как на каждом генераторе AD9851 формируется две формы сигнала параллельно, синус и меандр, это 4 канала в сумме и один канал с AD9833, на плате модуля которого установлен свой мультиплексор, который отвечает за форму выходного сигнала генератора № 3 (синус, меандр, треугольник), а выхода у системы только два. После мультиплексоров установлены на каждый из двух каналов два модуля неинвертирующих усилителей напряжения, перед их входами впаяны платы цифровых потенциометров, которые позволяют менять амплитуду уже сформированных форм сигналов и выводить на экран количественный показатель величины амплитуды. Чтобы не менять фазу сигнала, генерируемые сигналы подключены к неинвертирующим входам усилителя. Основные элементы схемы работают на КМОП логике, напряжение питания 5 вольт. Для питания усилителей (например, THS3001) может потребоваться двухполярное питание, что позволяет расширить его функционал для получения переменных сигналов с отрицательной полуволной. Для питания системы был выбран вариант с блоком питания 12 вольт 3 Ампера, с установкой dc-dc-преобразователя, для понижения напряжения до 5 вольт. Функциональная схема работы генератора и его управление микроконтроллером приведены на рисунке 2.

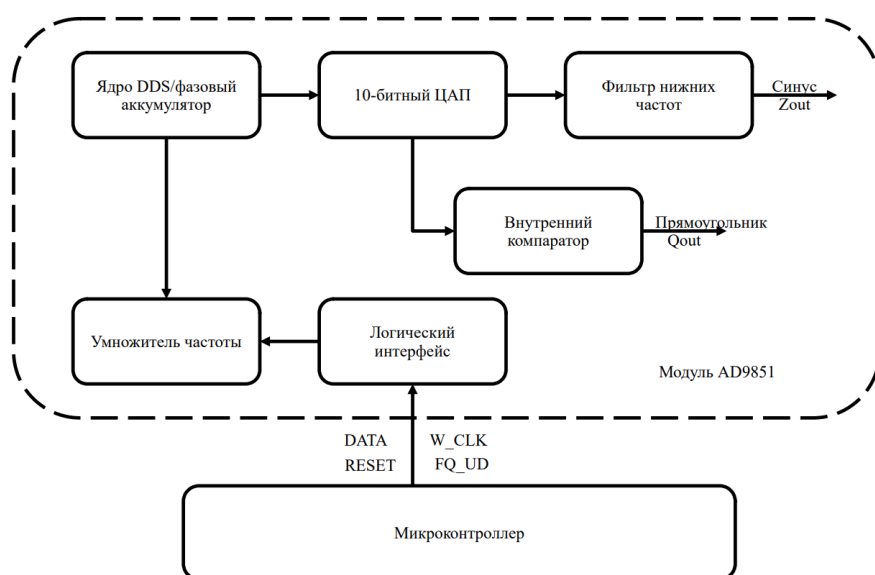


Рисунок 2 – Схема взаимодействия ключевых элементов генератора и управление DDS-микроконтроллером

Центральным элементом системы является генератор на DDS, включающий в себя фазовый аккумулятор, который формирует цифровое представление выходного сигнала. Сформированный цифровой код поступает на 10-битный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), после которого сигнал проходит через фильтр нижних частот, обеспечивающий сглаживание ступенчатой формы и выделение чистой синусоиды на выходе *Zout*. Параллельно предусмотрен тракт формирования прямоугольных импульсов: синусоидальный сигнал с выхода ЦАП подаётся на внутренний компаратор, где сравнивается с опорным напряжением, в результате чего на выходе *Qout* формируется меандр. Для повышения тактовой частоты до 180 МГц в DDS-генераторе используется встроенный умножитель частоты. Управление режимами работы синтезатора осуществляется микроконтроллером через логический интерфейс, включающий линии данных *DATA*, записи тактовых импульсов *W_CLK*, сброса *RESET* и обновления частоты *FQ_UD*. По импульсу на линии *FQ_UD* происходит одновременная загрузка 40-битного управляющего слова (32 бита задания частоты, 5 бит фазы и 1 бит управления умножителем) из временного сдвигового регистра в рабочий регистр, что обеспечивает мгновенное изменение параметров выходного сигнала [15].

ПРОГРАММНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ СИГНАЛОВ

Экспериментальный прототип биотехнической системы собран на базе микроконтроллера Arduino (платформа AVR), код устройства написан в среде Arduino IDE с использованием специализированных библиотек: *Adafruit_GFX.h*; *Adafruit_ST7789.h*; *SPI.h*; *Encoder.h* [16] для работы с TFT-экраном, энкодером и SPI-интерфейсом [17–18]. На рисунке 3 изображена блок-схема работы программной части биотехнической системы и приведены части кода с описанием.

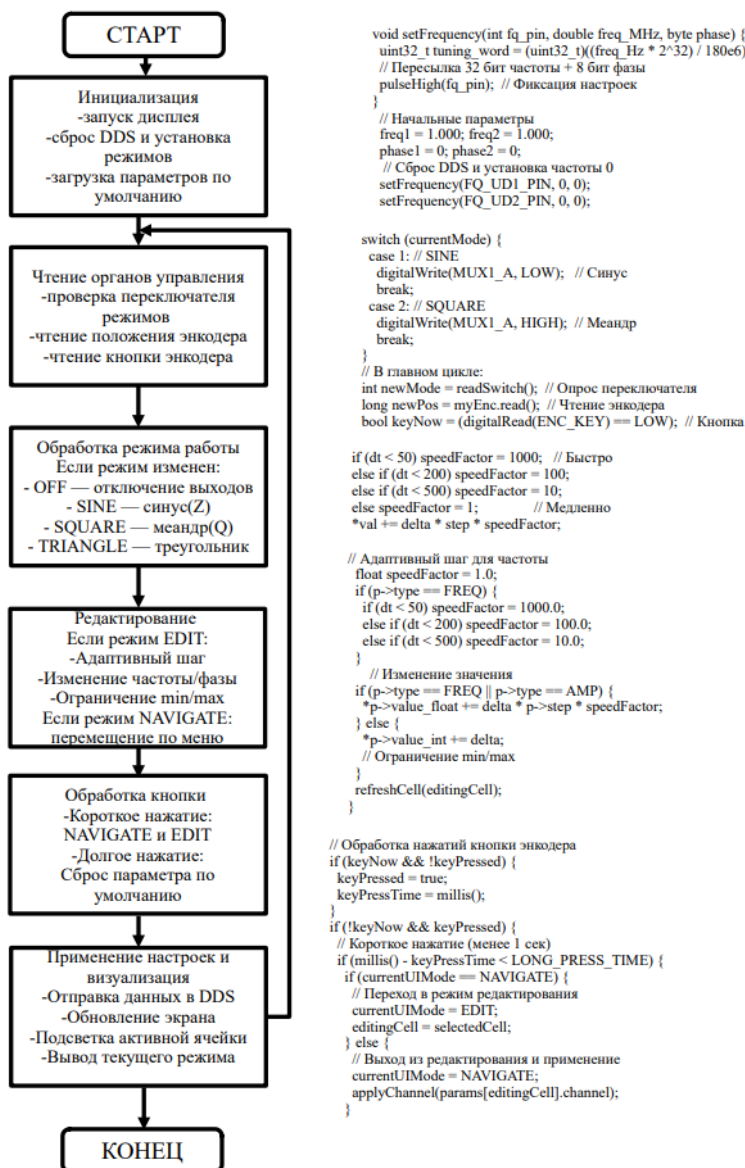


Рисунок 3 – Блок-схема работы программной части биотехнической системы

В функции *setup* () однократно после запуска системы происходит настройка цифровых выводов для управления *DDS* и мультиплексорами, инициализация графического дисплея и установка значений частоты и фазы по умолчанию. Опрос органов управления выполняется в каждом цикле. Переключатель режимов считывается через аналоговый вход с резисторным делителем, у каждой позиции 1–5 по возрастанию увеличивается номинал сопротивления в два раза, при первом запуске через *serial monitor* в код были записаны значения для программного определения положения переключателя. Энкодер – через библиотеку *Encoder*, кнопка – как цифровой вход с подтяжкой [19]. При изменении положения переключателя система отображает сигнал такой формы, которая проходит через блок мультиплексоров на выходные разъёмы *BNC*: *OFF* – все параметры обращаются в ноль, *SINE* – на выходе синус, *SQUARE* – прямоугольный сигнал, *TRIANGLE* – треугольный сигнал. Функция *applyAll()* применяет текущие настройки частоты к обоим каналам. В режиме навигации энкодер позволяет перемещать курсор по четырём ячейкам параметров. В режиме редактирования пользователь меняет значение выбранного параметра. Для настроек частоты реализован адаптивный шаг: при быстром вращении изменение происходит с шагом до 1 МГц, при медленном – 1 кГц [20]. Короткое нажатие на ручку энкодера переключает между режимами навигации и редактирования. В режиме навигации долгое нажатие кнопки энкодера сбрасывает выбранный параметр к значению по умолчанию. На заключительном этапе происходит обновление команд генераторам (*DDS*) в соответствии с новыми параметрами и перерисовка интерфейса. Ниже приведён общий вид интерфейса с регулируемыми показателями частоты, амплитуды, фазы (рис. 4). На рисунке 5 изображён общий вид собранной системы.

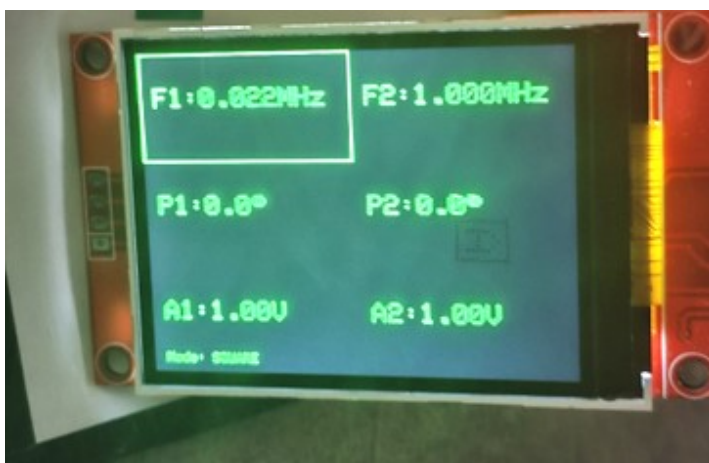


Рисунок 4 – Пользовательский интерфейс TFT 2,4

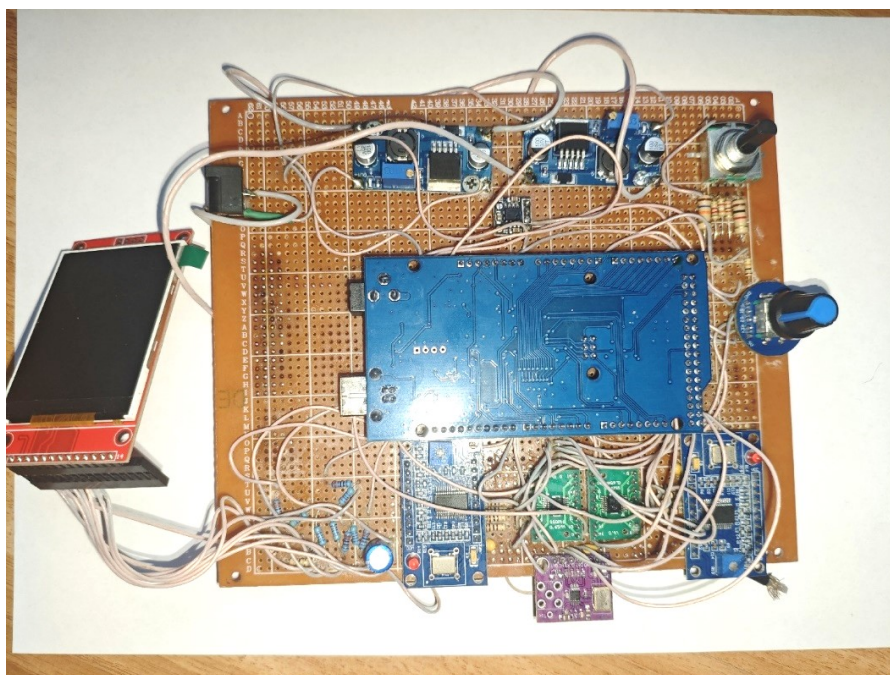


Рисунок 5 – Общий вид пробного макета биотехнической системы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы разработан и исследован прототип двухканальной DDS-системы генерации сигналов для физиотерапевтических исследований. Собрана структурная схема на базе двух AD9851 и AD9833, написано программное обеспечение для Arduino с TFT-экраном и энкодером. Заявленные характеристики системы: диапазон частот синусоидального сигнала – 40 МГц, меандра и треугольника – 30 МГц, дискретность – 0,04 Гц, время переключения формы – менее 10 мкс.

Научная новизна. Предложена и реализована программируемая платформа, объединяющая два независимых DDS-канала (AD9851), коммутацию трёх форм сигнала и микроконтроллерное управление с адаптивным шагом изменения частоты. Разработанная система покрывает частотный диапазон от единиц герц до 40 МГц, что позволяет генерировать сигналы для индуктотермии (13,56 МГц), УВЧ-терапии (27,12 МГц), интерференцтерапии (3–5 кГц), ЧЭНС (10–200 Гц) и электросна (1–150 Гц) в одном устройстве.

Практическая значимость. Прототип может использоваться как:

- 1) лабораторный стенд для исследования реакции биологических тканей на электрические сигналы с различными параметрами;
- 2) базовая платформа для создания физиотерапевтических аппаратов нового поколения;
- 3) направления дальнейших исследований. Проведение клинических испытаний на базе медицинского учреждения.

Список источников

1. Поддубная, О. А. Синусоидальные модулированные токи в клинической физиотерапии / О. А. Поддубная. – Томск : Сибирский государственный медицинский университет, 2017. – С. 39.
2. Сорокин, С. А. Использование электрических токов и электромагнитных полей в терапии / С. А. Сорокин. – Владимир : Владимирский государственный университет, 2006. – С. 10–18.
3. Алексеев, А. А. Физические процессы, протекающие в биотканях при высокочастотном электромагнитном облучении / А. А. Алексеев, Ю. Б. Захаров, М. Ю. Захаров, А. Б. Смирнов, Е. Г. Толкачева. – Краснодар : Кубанский государственный университет, С. 10–13.
4. Герасименко, М. Ю. Применение интерференционных токов в медицинской реабилитации / М. Ю. Герасименко, И. С. Евстигнеева // Вестник восстановительной медицины. – 2022. – № 1. – С. 45–52.
5. Юсупов, Ф. А. Ультравысокочастотная терапия в неврологии / Ф. А. Юсупов. – Ош, Кыргызстан : Ош государственный университет, 2022. – С. 48–52.
6. Ушакова, М. А. Чрескожная электронейростимуляция: современные подходы и перспективы применения / М. А. Ушакова, А. Г. Куликов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. – 2021. – Т. 20, № 3. – С. 267–274.
7. Кадочникова, Е. Ю. Динамическая электронейростимуляция в лечении остеоартрита коленных суставов / Е. Ю. Кадочникова, О. М. Лесняк. – Санкт-Петербург : Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова, 2018. – С. 30–36.
8. Синюхин, А. О. Реализация программного генератора сигналов различной формы на базе микроконтроллера семейства STM32F10X / А. О. Синюхин, С. В. Орлов, А. Е. Яковлев, А. С. Ревенко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. – 2022. – Т. 12, № 8. – С. 76–83.
9. Турсунов, М. А. Разработка медицинского терапевтического аппарата «Электросон Supromed» и его технические параметры / М. А. Турсунов, А. Р. Солиев, С. А. Убайдуллаев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. – 2021. – С. 1–6.
10. Дьяков, В. П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяков. – Москва : ДМК Пресс, 2020. – С. 384.
11. Тюрин, В. А. Метод прямого цифрового синтеза в генераторах сигналов специальной формы SFG-2110 и АКПИ-3410/3 : учебно-методическое пособие / В. А. Тюрин. – Казань : Казанский федеральный университет, 2015. – С. 74.
12. Фомин, Д. В. Программируемый генератор синусоидального сигнала / Д. В. Фомин, Д. А. Шеметов, Д. О. Струков // Электротехника, электронная техника, информационные технологии. – 2024. – № 5. – С. 16–22.
13. Захарченко, В. Д. Математическое моделирование фазочувствительного режима работы схемы радиоимпульсного стробоскопического преобразователя / В. Д. Захарченко, О. В. Пак // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1. Математика. Физика. – 2017. – № 2 (39). – С. 75–81.
14. Власенко, А. Применение цифровых потенциометров фирмы Analog Devices / А. Власенко // Компоненты и технологии. – 2006. – № 12. – С. 76–81.
15. Романов, А. С. Применение методов прямого цифрового синтеза в прецизионных генераторах сигналов / А. С. Романов, А. Т. Дудин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2021. – № 2. – С. 45–58.
16. Мёрфи, Е. Прямой цифровой синтез DDS в тестовом, измерительном и коммуникационном оборудовании / Е. Мёрфи, К. Слэттери // Компоненты и технологии. – 2008. – № 7. – С. 116–120.
17. Паршуков, М. Ю. Аппаратно-программный комплекс для измерения динамических параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков. – Пенза : Пензенский государственный университет, 2014. – С. 32–36.
18. Блум, Дж. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства / Дж. Блум. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2020. – С. 384.

19. Sommer, U. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino / У. Sommer. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2020. – С. 256.

20. Петров, В. Н. Разработка пользовательских интерфейсов для микроконтроллерных систем на основе энкодеров и графических дисплеев / В. Н. Петров, К. И. Сидоров // Программные системы и вычислительные методы. – 2022. – № 3. – С. 112–124.

References

1. Poddubnaya, O. A. *Sinusoidal modulated currents in clinical physiotherapy*. Tomsk, Siberian State Medical University, 2017. 39 p. (In Russ.).

2. Sorokin, S. A. *Use of electric currents and electromagnetic fields in therapy*. Vladimir, Vladimir State University, 2006, pp. 10–18 (In Russ.).

3. Alekseev, A. A., Zakharov, Yu. B., Zakharov, M. Yu., Smirnov, A. B., Tolkacheva, E. G. *Physical processes occurring in biological tissues under high-frequency electromagnetic irradiation*. Krasnodar, Kuban State University, pp. 10–13. (In Russ.).

4. Gerasimenko, M. Yu., Evstigneeva, I. S. Use of interference currents in medical rehabilitation. *Bulletin of Restorative Medicine*, 2022, no. 1, pp. 45–52 (In Russ.).

5. Yusupov, F. A. *Ultra-high-frequency therapy in neurology*. Osh, Kyrgyzstan, Osh State University, 2022, pp. 48–52 (In Russ.).

6. Ushakova, M. A., Kulikov, A. G. Transcutaneous electrical neurostimulation: modern approaches and application prospects. *Physiotherapy, Balneology and Rehabilitation*, 2021, vol. 20, no. 3, pp. 267–274 (In Russ.).

7. Kadochnikova, E. Yu., Lesnyak, O. M. *Dynamic electrical neurostimulation in the treatment of knee osteoarthritis*. St. Petersburg: North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, 2018, pp. 30–36 (In Russ.).

8. Sinyukhin, A. O., Orlov, S. V., Yakovlev, A. E., Revenko, A. S. Implementation of a software generator of various waveforms based on the STM32F10X microcontroller. *Bulletin of the South-West State University. Series: Control, Computer Science, Informatics*, 2022, vol. 12, no. 8, pp. 76–83 (In Russ.).

9. Tursunov, M. A., Soliev, A. R., Ubaydullaev, S. A. Development of the supromed electroson medical therapeutic device and its technical parameters. *Bulletin of the South-West State University. Series: Control, Computer Science, Informatics*, 2021, pp. 1–6. (In Russ.).

10. Dyakonov, V. P. *Signal Generation and Generators*. Moscow, DMK Press, 2020. 384 p. (In Russ.).

11. Tyurin, V. A. *Direct digital synthesis method in SFG-2110 and AKIP-3410/3 special-form signal generators: a tutorial*. Kazan, Kazan Federal University, 2015. 74 p. (In Russ.).

12. Fomin, D. V., Shemetov, D. A., Strukov, D. O. Programmable sine wave generator. *Electrical Engineering, Electronic Engineering, Information Technology*, 2024, no. 5, pp. 16–22 (In Russ.).

13. Zakharchenko, V. D., Pak, O. V. Mathematical Modeling of Phase-Sensitive Operating Mode of a Radio-Pulse Stroboscopic Converter Circuit. *Bulletin of Volgograd State University. Series 1. Mathematics. Physics*, 2017, no. 2, pp. 75–81 (In Russ.).

14. Vlasenko, A. Application of Digital Potentiometers from Analog Devices. *Components and Technologies*. 2006, no. 12, pp. 76–81 (In Russ.).

15. Romanov, A. S., Dudin, A. T. Application of Direct Digital Synthesis Methods in Precision Signal Generators. *Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrument Engineering"*, 2021, no. 2, pp. 45–58. (In Russ.).

16. Murphy, E., Slattery, K. Direct Digital Synthesis of DDS in Test, Measurement, and Communication Equipment. *Components and Technologies*, 2008, no. 7, pp. 116–120 (In Russ.).

17. Parshukov, M. Yu. Hardware and Software Complex for Measuring Dynamic Parameters of Operational Amplifiers. Penza, Penza State University, 2014, pp. 32–36 (In Russ.).

18. Bloom, J. Exploring Arduino: tools and methods of technical wizardry. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2020. 384 p. (In Russ.).

19. Sommer, U. Programming Arduino/Freeduino microcontroller boards. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2020. 256 p. (In Russ.).

20. Petrov, V. N., Sidorov, K. I. Development of user interfaces for microcontroller systems based on encoders and graphic displays. *Software Systems and Computational Methods*, 2022, no. 3, pp. 112–124 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 27.04.2026; одобрена после рецензирования 14.05.2026; принята к публикации 15.05.2026.

The article was submitted 27.04.2026; approved after reviewing 14.05.2026; accepted for publication 15.05.2026.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 616.12-073.7

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МОБИЛЬНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Солодовников Федор Сергеевич, Кубанский государственный университет, 350040, Российская Федерация, г. Краснодар ул. Ставропольская, 149,
магистрант, ORCID: 0009-0003-9939-3245, e-mail: solodovnikovfedor90@gmail.com

В статье рассматривается положительное влияние использования бесконтактных технологий в медицинских мобильных приложениях. Актуальность исследования обусловлена глобальным ростом сердечно-сосудистой заболеваемости и необходимости перехода от эпизодической диагностики к системам для непрерывного мониторинга. Беспроводные технологии занимают высокое место в современной медицине, их конструкция и функциональность очень просты в использовании как для врача, так и для пациента. Нами поставлена задача рассмотреть ту сторону аппарата, благодаря которой он изменит рынок медицинского оборудования и поможет в лечении и диагностике различных болезней. На что может повлиять использование данных технологий, как существенно они поменяют проведение осмотра пациента, а также будет описан новый метод мониторинга пациента – дистанционный.

Ключевые слова: беспроводные технологии, телемедицина, мобильные медицинские приложения, диагностика, электрокардиограмма

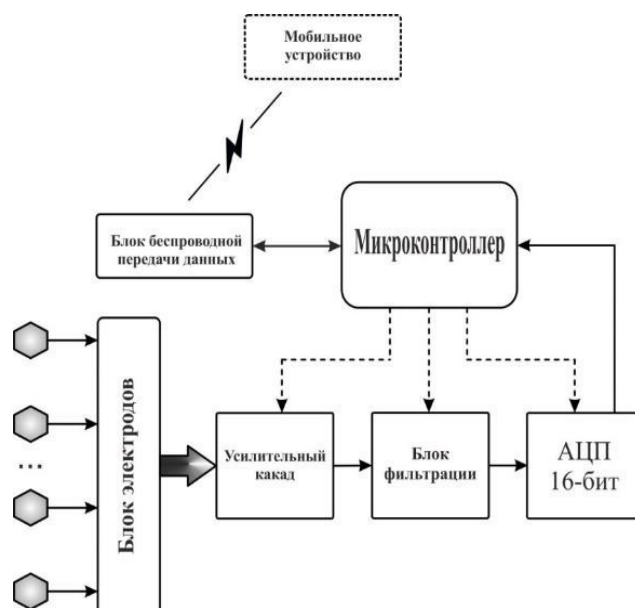
THE POSITIVE EFFECT OF THE USE OF WIRELESS TECHNOLOGY IN MOBILE MEDICAL APPLICATIONS

Solodovnikov Fedor S., Krasnodar State University, 149 Stavropolskaya St., Moscow, 350040, Russian Federation,
Master's student, ORCID: 0009-0003-9939-3245, e-mail: solodovnikovfedor90@gmail.com

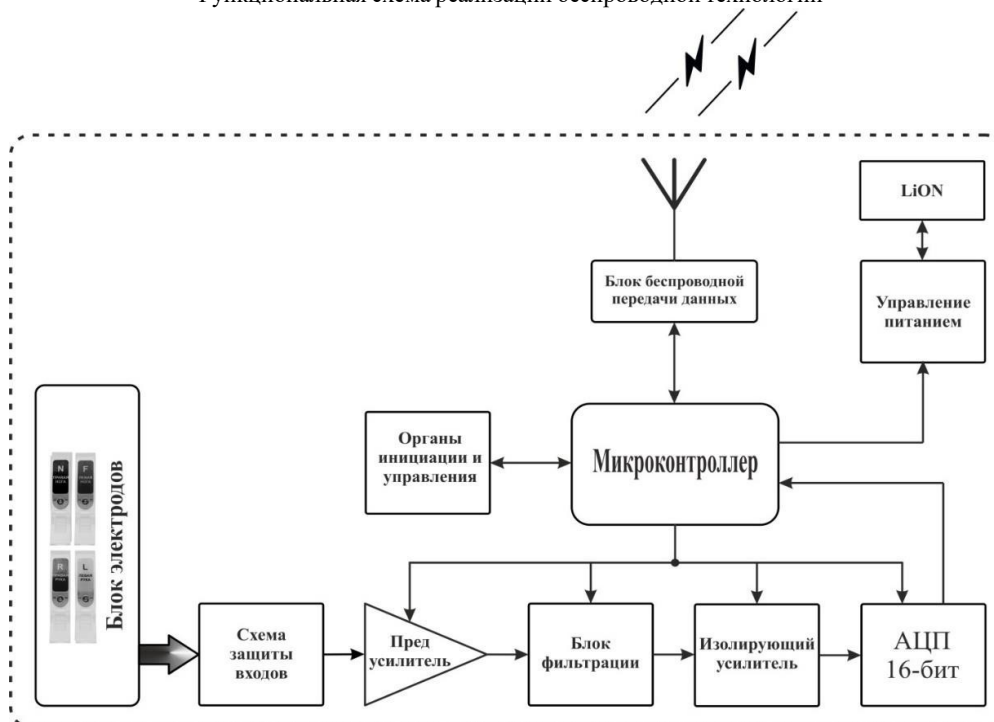
The article discusses the positive impact of the use of contactless technologies in medical mobile applications. The relevance of the study is due to the global increase in cardiovascular diseases and the need to move from sporadic diagnosis to systems for continuous monitoring. Wireless technologies have a high place in modern medicine, their design and functionality are very easy to use for both the doctor and the patient. Our goal is to explore the aspects of this device that will revolutionize the medical equipment market and revolutionize the treatment and diagnosis of various diseases. We will discuss the potential impact of these technologies, how they will transform the patient examination process, and introduce a new method of remote patient monitoring.

Keywords: wireless technologies, telemedicine, mobile medical applications, diagnostics, electrocardiogram

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Функциональная схема реализации беспроводной технологии



Архитектура программного обеспечения беспроводного анализатора ЭКГ



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в здравоохранении наблюдается ряд трендов. Современная медицина испытывает проблемы с медицинским персоналом, с чем связан процент врачебных ошибок, с невозможностью дистанционно наблюдать за состоянием здоровья пациента, за тем, как протекает его болезнь. Также растёт процент населения (по прогнозам ООН до 8,5 млрд к 2030 г.) и продолжительность жизни (основной рост наблюдается у взрослых от 65 лет и выше), что приводит к риску выявления хронических неинфекционных заболеваний, которые являются основной причиной смертности и финансовых затрат здравоохранения. Именно для этого была поставлена задача разработать устройства, которые в корне решат эту проблему, помогут сэкономить время врача во время проведения различных процедур, позволят вести непрерывный дистанционный мониторинг за пациентом, оптимизацию логистических процессов в медицинских учреждениях, своевременное уведомление об ухудшении

состояния здоровья пациента, обнаружение патологий за счёт беспроводных сенсоров. Появление на рынке беспроводных технологий и мобильных приложений должно в корне изменить ситуацию в этой области. Рассмотрим, какие преимущества имеют беспроводные технологии, как они могут повлиять на здравоохранение и сумеют ли они его изменить [1].

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

Рассмотрим сначала основные направления использования беспроводных технологий в медицинской технике и технологиях. Информационные технологии стали неотъемлемой частью жизнедеятельности человека, возникает рост тенденций по внедрению информационных технологий в различные отрасли, не обошло это и здравоохранение. Так как цифровизация данной сферы напрямую влияет на здоровье и благополучие пациентов.

Основным направлением внедрения информационных технологий в здравоохранении является ведение медицинских записей персоналом, а также назначение лекарств. При помощи мобильных технологий у специалистов есть возможность создавать облачные хранилища, где может храниться информация о пациенте, о его болезни и т. д., при этом пациент может иметь доступ к этой информации и вносить записи о своем самочувствии, что позволяет организовать удалённую обратную связь пациент – врач.

Внедрение беспроводных технологий существенно расширяет указанные выше возможности информационных технологий и позволяет организовать дистанционное наблюдение за состоянием здоровья пациентов. Например, контроль протекания болезни, уведомления курирующего его специалиста о возникновении опасности здоровья [2]. Например, беспроводной браслет, который имеет возможность собирать информацию о жизненно важных показателях пациента в режиме реального времени и передавать на смартфон врача посредством беспроводной передачи.

Использование таких технологий облегчает поведение и состояние пациентов при проведении разных процедур. Возьмём проведение традиционного снятия ЭКГ – такая процедура является важной частью, так как она позволяет проанализировать состояние и работу сердца пациента для лечения различных кардиологических болезней. Во время процедуры применяется большое количество отведений (12 электродов) для измерения электрических потенциалов, они плотно крепятся к телу пациента, так как значения регистрируемых потенциалов очень малы. Соответственно, у человека возникает дискомфорт и страх при виде громоздкого аппарата. Кроме всего прочего, время процедуры очень длительное, начиная от подготовки пациента и заканчивая самим процессом. Чтобы решить вышеперечисленные проблемы, были созданы бесконтактные датчики. Главная их особенность – высокая чувствительность и отсутствие необходимости в прямом контакте с кожей для снятия измерения. Передача данных поступает сразу на устройство, это может быть либо компьютер, либо любое другое мобильное устройство.

Ещё одной особенностью беспроводных технологий является дистанционный мониторинг, т. е. наблюдение врачом за болезнью пациента при помощи различных бесконтактных устройств. Такой метод помогает людям, у которых имеются хронические заболевания, например, проблемы с диабетом, гипертонические заболевания. Пациенту, имеющему диабет, необходим аппарат, который будет вести круглосуточное наблюдение за уровнем сахара в крови. Поэтому были созданы бесконтактные глюкометры. Устройство может представлять из себя одноразовый пластырь, куда встроен датчик, который оценивает уровень глюкозы в крови и жидкостях и передаёт информацию на устройство лечащего доктора или пациента. Также такое устройство может вести непрерывный мониторинг. Оно состоит из трёх частей – датчика, передатчика, программного обеспечения. Сам же датчик вводится во внутрь пальца.

Беспроводные технологии играют важнейшую роль в телемедицине. Телемедицина – это прикладная область в медицине, связанная с дистанционным получением врачебной помощи путём информационных и телекоммуникационных технологий (посредством интернета врач с пациентом обменивается информацией). Основное место занимают устройства, которые выполняют роль сбора, записи, измерения, анализа и передачи медицинских данных. С бесконтактными технологиями телемедицина имеет симбиозное отношение. Благодаря беспроводным устройствам, врач в реальном времени может проводить диагностику, консультирование, лечить, получать данные о протекании заболевания пациента, следить за их показателями и течением болезни, в конечном итоге проводить телеконсультацию, чтобы назначить принятие лекарств. Эти устройства могут применяться в любых местах, начиная от мегаполисов и заканчивая сельской местностью [3].

Остановимся теперь на технических решениях применения беспроводных технологий в медицинской аппаратуре:

1. Технические особенности отечественного беспроводного устройства на базе ПАВ.

Система беспроводного мониторинга состоит из интеллектуального устройства на поверхностных акустических волнах и материалах полупроводниковой и функциональной электроники. Устройство работает по принципу радиолокатора с пассивной целью. Датчик на ПАВ работает

в разрешённых для устройств малого радиуса действия SRD диапазонах в режиме линии задержки в разрешённых диапазонах частот.

Датчик состоит из корпуса (К), в котором находится пьезоэлектрический звукопровод (П). На его поверхности расположены приёмо-передающий ВШП (3), который через выводы (2) соединён с антенной и отражательные ВШП (4), один из них (5) соединён с импедансом (6) через выводы, который состоит из последовательно соединённых индуктивности L-7 и мембранным конденсатором. Конденсатор состоит из основания (О), на котором находится центральный электрод (8) и крайний электрод (9), соединённые между собой упругой металлической пластиной (10) таким образом, что между электродом и пластиной имеется затвор (11) (рис. 1).

Отличительными особенностями датчиков на ПАВ являются их невосприимчивость к электромагнитным помехам, отсутствие возможности клонирования, подделки, широкий температурный режим работы, невозможность обнаружения иными средствами, помимо средств, входящих в состав системы мониторинга с одновременной радиочастотной идентификацией. Дальность считывания пассивных акустоэлектронных датчиков, работающих в режиме линий задержки, может достигать десятков метров.

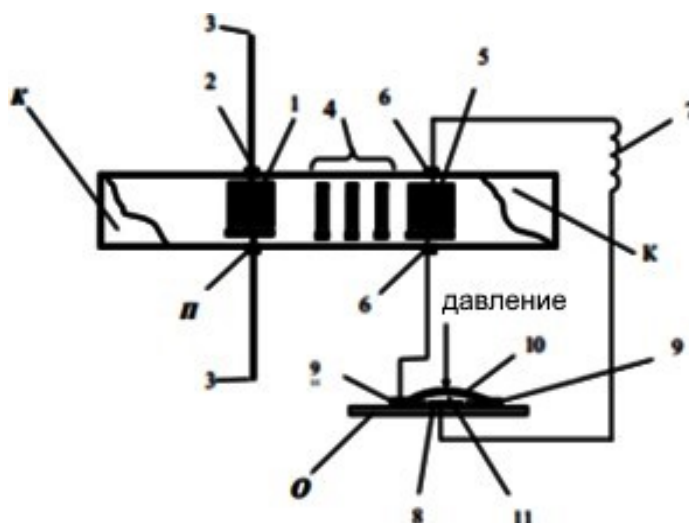


Рисунок 1 – Структурная схема устройства на поверхностных акустических волнах

Система содержит набор бесконтактных биопотенциальных электродов, соединённых одним общим проводом. Датчики могут находиться в непосредственном контакте с кожей либо быть встроены в ткань или одежду. Базовый блок обеспечивает питание всей системы и содержит беспроводной передатчик для беспроводной передачи данных на компьютер или любое другое внешнее устройство. Для определения точки заземления используется один датчик с клеевым или сухим контактом, расположенным в любом удобном месте с базовым блоком.

Результаты исследования представлены на рисунке 2 и помогают понять, что в случае, когда электрод прижат к коже на груди, показана наилучшая эффективность. Хорошо виден весь комплекс PQRS, а качество измерения сравнимо с качеством, которое получает врач при использовании стандартного клинического адгезивного электрода для ЭКГ.

Основным преимуществом применения таких электродов является работа через изоляцию либо одежду, т. е. сигнал остаётся чётким даже через тонкие изолирующие слои. Если изоляция толстая, то возникают шумы, которые начинают создавать проблемы, затеняя более мелкие функции, такие как Р-образная волна, но при этом сигнала достаточно для определения сердцебиения.

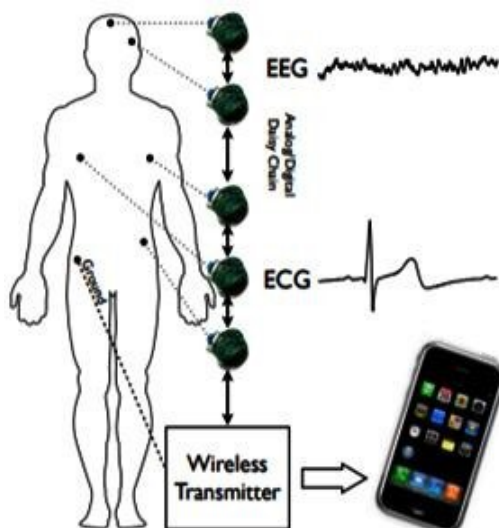


Рисунок 2 – Беспроводная система измерения ЭКГ и ЭЭГ

В таблице приведены основные технические характеристики некоторых устройств на рынке медицинской техники.

Таблица – Технические характеристики устройств

Критерий сравнения	Кардиовизор 6С	Ангиолайн-ЭКГ	KardiaMobile 6L	ScanWatch
Количество отведений	6	1	6	1
Частота дискретизации	500	250	300	512
Разрядность АЦП	16	12	16	16
Входное сопротивление	100	50	300	200
Автономность работы	48 ч	24 ч	24 ч	30 дней
Время зарядки	2 ч	1,5 ч	1 ч	2 ч
Поддержка Wi-Fi	Нет	Нет	Нет	Да
Веб-интерфейс	Да	Нет	Да	Да
Мобильное приложение	Да	Да	Да	Да

Как видно из таблицы, основные различия заключаются в технических особенностях устройств. Например, время работы зарубежного устройства ScanWatch намного больше, чем у Кардиовизора, Ангиолайна и KardiaMobile. Но при этом частота дискретизации больше у устройства Кардиовизор 6С. Такой параметр АЦП позволит получить более качественный сигнал за счёт большого количества точек.

Небольшой обзор существующих решений позволяет перейти к концепции построения архитектуры беспроводной медицинской техники.

АРХИТЕКТУРА БЕСПРОВОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭКГ

В структуру беспроводной передачи входит сбор информации, анализ и передача на ПК. В состав такого устройства обычно входят модули первичной обработки сигнала, например датчик. Основным преимуществом таких систем является быстрая передача информации.

Беспроводной анализатор ЭКГ, представленный на рисунке 3, строится на основе классической схемы измерения биопотенциалов с применением дополнительных узлов. Рассмотрим каждый блок схемы и его функции.

Данные поступают на электрод, которые крепятся к телу человека, они снимают электрические сигналы, поступающие от сердца. Сигнал принимает датчик, который является устройством съёма, он реагирует своим чувствительным элементом на воздействие измеряемой величины, а также осуществляет преобразование этого воздействия в удобную для передачи форму. Сигнал поступает

на дифференциальный усилитель, который обеспечивает подавление высокого синфазного сигнала (CMRR) и отфильтровывает на стадии аналогового преобразования. Чтобы биосигнал был чистым и гладким без помех, которые могут появиться вследствие движения пациента, либо помех, вызванных электрооборудованием, в системе применяются фильтры. Основу блока управления и анализа составляет микроконтроллер, который преобразует сигнал в цифровой, за счёт встроенного преобразователя и Bluetooth-модуля передаёт информацию на мобильное вычислительное устройство, также в его задачи входит управление всеми устройства и организация обратной связи с мобильным устройством [4].

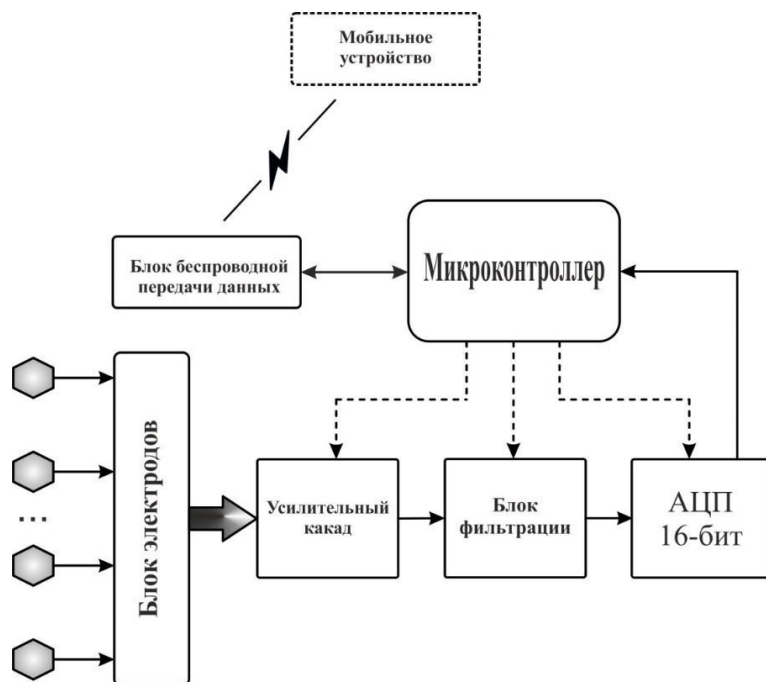


Рисунок 3 – Функциональная схема реализации беспроводной технологии

Рассмотрим подробную функциональную схему беспроводного анализатора ЭКГ, представленную на рисунке 4.

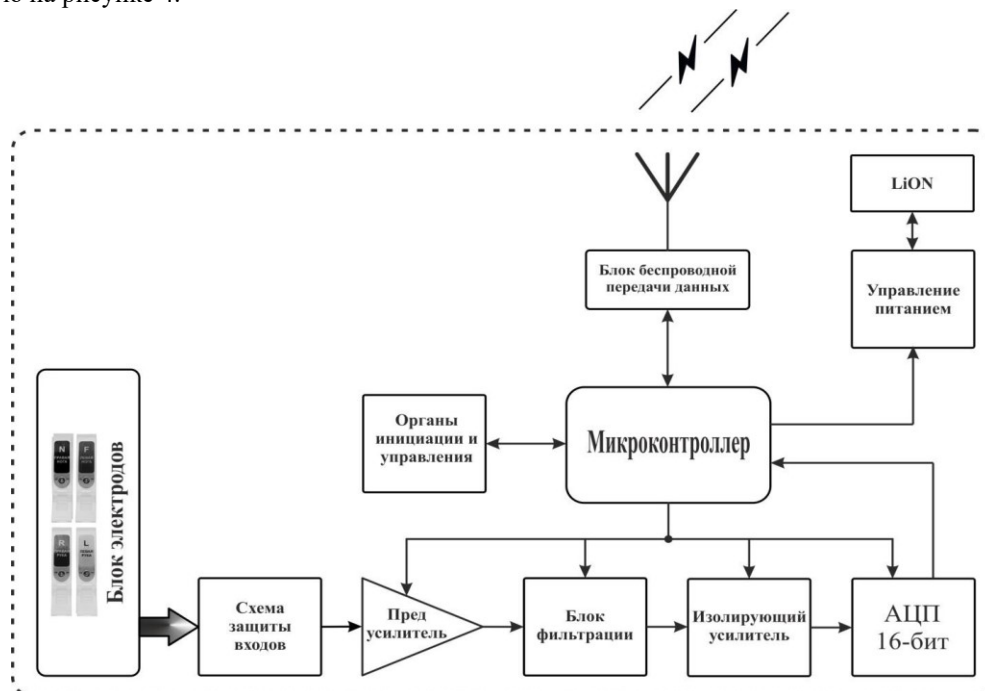


Рисунок 4 – Функциональная схема беспроводного устройства

Беспроводный анализатор ЭКГ включает в себя следующие компоненты:

- электроды. Они выполняют функцию снятия электрических сигналов с тела пациента. Является первичным звеном регистрации электрической активности сердца, преобразуя ионные сигналы в электрические;
- дифференциальный усилитель. Этот усилитель выполняет роль подавления синфазных шумов, когда подаётся напряжение на оба входа устройства. Также усиливает разность потенциалов между двумя измерительными электродами;
- блок фильтрации. Помогает удалять помехи, шумы, а именно выделять желательные сигналы и удалять нежелательные [5]. Обеспечивает подавление шумов, возникающих в ходе мышечного тремора (ФВЧ), либо в ходе электромеханического движения. Его использование влияет на гладкость и чистоту биосигнала;
- изолирующий усилитель. Предназначен для создания гальванической развязки, тем самым обеспечивая защиту пациента от поражения электрическим током. Кроме того, защищает микроконтроллер и радиомодули от высоковольтных разрядов;
- предусилитель. Является первым активным входным каскадом, расположенным сразу после электродов. Он подготавливает сигнал, который является на начальном этапе грязным, для дальнейшей обработки, при этом не изменяя и не фильтруя его [6];
- аналогово-цифровой преобразователь. Применяется 12-битный. Выполняет роль оцифровки сигнала, улавливая электроды, что помогает избавиться от большого влияния помех;
- микроконтроллер. Имеет двухъядерную архитектуру, на борту имеет чип Cortex M4 с тактовой частотой до 64 МГц. Выполняет роль обработки и сбора информации для дальнейшей передачи на мобильное устройство. Отличается высокой производительностью и низким энергопотреблением [7];
- блок управления и индикации. Блок управления является главным элементом всего аппарата. Состоит из микроконтроллера и аналого-цифрового преобразователя и flash-памяти. Осуществляет такие функции, как управление сбором данных, питанием и памятью, также выполняет цифровую обработку сигнала, например удаление дрейфа [8]. Блок индикации является важнейшим элементом, взаимодействуя между устройством и оператором, а именно визуализирует данные кардиограммы в реальном для быстрой оценки качества регистрации, также информирует о состоянии заряда аккумулятора;
- BLE (Bluetooth Low Energy). Протокол соответствует стандарту 802.15.4. Данная технология применяется для быстрой передачи данных. В медицине она зарекомендовала себя также благодаря энергопотреблению, стандартный Bluetooth потребляет больше энергии, соответственно, не удобен для применения в малых портативных медицинских устройствах. Её особенности – скорость передачи данных до 1 Мбит/с, радиус действия до 10 метров [9];
- мобильное устройство. Выполняет роль приёмника информации для последующей визуализации изображения для специалиста. Также это может быть любое другое мобильное устройство;
- блок управления питанием. Предназначен для обеспечения длительной автономной работы всего устройства, контроля заряда аккумулятора [10].

Сигнал поступает с электродов на дифференциальный усилитель, затем у нас происходит аналоговая обработка сигнала. Следовательно, усиленный сигнал передаётся на блок фильтра, а также на блок АЦП как от фильтра, так и усилителя. Блок АЦП производит оцифровку сигнала. Блок управления и передачи сигнала состоит из микроконтроллера и модуля беспроводной передачи данных BLE [11]. Выполняет сбор и обработку полученных данных. Модуль BLE играет роль связи источника сигнала с приёмником. На схеме также имеется блок цепи питания, который может состоять из Li-on-батарей [12].

ПРОГРАММНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ БЕСПРОВОДНОГО АНАЛИЗАТОРА ЭКГ

Проведя анализ аппаратного построения анализатора, необходимо остановиться на его программной части, а также связанной с ней методике применения. Благодаря вышеописанным характеристикам, можем разработать архитектуру программного обеспечения устройства (рис. 5).



Рисунок 5 – Архитектура программного обеспечения беспроводного анализатора ЭКГ

Рассмотрим назначение каждого модуля. Устройство беспроводного анализатора будет управляться при помощи центрального модуля, который будет управлять всеми другими модулями. Модуль снятия сигнала выполняет функцию измерения сигнала, поступившего от сердца [13]. Модуль управления прерываниями осуществляет задание параметров и выполнение соответствующих процедур при возникновении события в регистрах внешних прерываний. Модуль предварительной обработки сигнала осуществляет фильтрацию усреднения сигнала от разных помех, либо синфазного сигнала. Модуль связи с устройствами выполняет роль как отображения всей информации на устройство, так и всех параметров работающего устройства. Модуль управления устройствами является необязательным и дополнительным. Модуль связи выполняет роль обмена информацией между источником и приёмником сигнала [14].

Работоспособность данной системы задаётся при помощи интернета вещей (IoT). Все алгоритмы работы модулей достигаются с помощью языка программирования C++. На рисунке 6 приведён программный модуль беспроводного соединения. Для каждого модуля мы можем задавать определённые задачи благодаря программной реализации. Для более успешного выполнения поставленной задачи можно выбрать более подходящую библиотеку. Например, библиотека Scipy позволяет проектировать с применением цифровых фильтров, а также обрабатывать многомерные сигналы. Либо в среде C++ очень популярна платформа Gamma, которая предоставляет библиотеки для синтеза, фильтрации цифровых сигналов, также включает в себя функции, которые реализуют фильтры с бесконечно импульсной характеристикой (БИХ) [15].

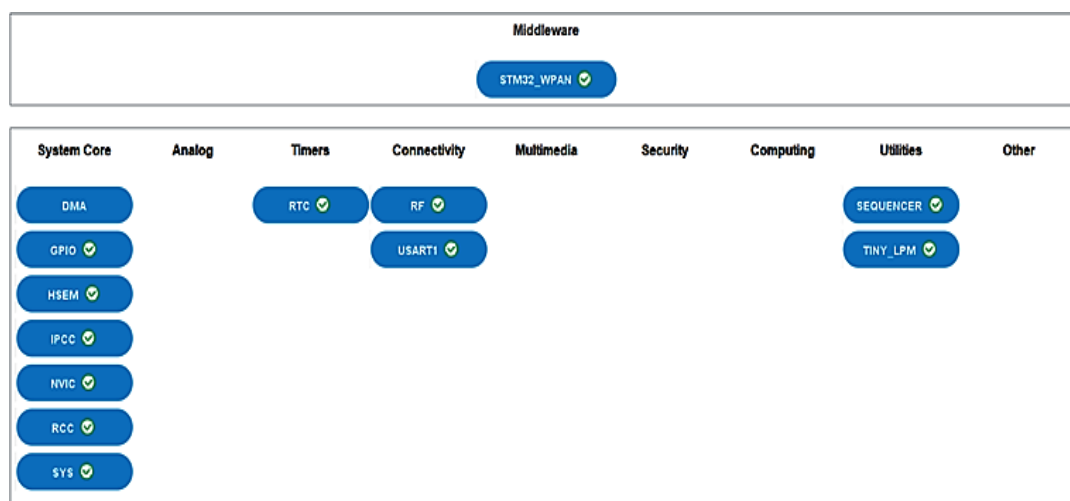


Рисунок 6 – Системный вид беспроводного соединения в Cube IDE

На рисунке 6 представлена схема конфигурации микроконтроллера STM32WB55CGU6. В приложении Cube IDE была создана архитектурная сеть работы микроконтроллера STM32WB55CGU6. Она изображена на рисунке 4. Сеть подразделена такие категории, как Системное ядро (System core), внутри него задаются параметры доступа к памяти (DMA), включаются порты ввода-вывода общего назначения (GPIO), также включается аппаратный семафор, чтобы управлять процессами в микроконтроллере, например, контролировать доступ к общим ресурсам [14]. IPCC предназначен для межпроцессорной связи, для управления сбросом и тактированием включается параметр RCC. Для задания времени включается таймер. А чтобы обеспечить связь между приёмником и платой, потребуется включение радиочастотного модуля RF, входящего в раздел соединение (Connectivity). Также в архитектуре активирован секвенсор (sequencer) для низкого потребления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования рассмотрены особенности применения беспроводных технологий в медицине, которые легли в разработку структуры беспроводного анализатора ЭКГ. Функциональные особенности беспроводного анализатора ЭКГ и спроектированные схемы устройства позволили обеспечить эффективность проведения снятия измерения ЭКГ и безопасной эксплуатации прибора. А построение устройства на основе STM32 позволило внедрить протокол Bluetooth Low Energy.

В работе представлены результаты схемотехнических решений по созданию беспроводной технологии по снятию ЭКГ. В результате чего был разработан образец самого устройства. Проведённые опыты выявили следующие результаты:

- автономность работы составляет до 6 дней, при использовании Li-on-батарейки;
- диапазон чувствительности носимого устройства составляет от 84 до 95 %;
- небольшая задержка передачи данных, при использовании 5G, порядка 110 м/с;
- протокол Bluetooth Low Energy позволяет передавать данные в условиях помех;
- автономность работы устройства до 14 дней без подзарядки;
- возможность интеграции с системами жизнеобеспечения для комплексной оценки физиологического статуса.

Список источников

1. Фокин, С. Ю. Обзор медицинских приложений, устройств и технологий связи интернета вещей / С. Ю. Фокин, Р. В. Киричек // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Т. 4, № 4. – С. 67–80.
2. Честнов, О. П. Мобильное здравоохранение мировой опыт и перспективы / О. П. Честнов С. А. Бойцов, А. А. Куликов, Д. И. Батурин // Профилактическая медицина. – 2014. – Т. 17, № 4. – С. 3–10.
3. Чу, Ю. Дж. Применение бесконтактных датчиков для мониторинга состояния здоровья в больнице / Ю. Дж. Чу, Г. У. Ли, Дж. С. Мун, М. К. Чанг // Секция семейной и первичной медицины. – 2024. – Т. 11, № 9. – С. 15–20.
4. Багдасарян, А. С. Беспроводной мониторинг биологических сигналов сердечно-сосудистой системы человека / А. С. Багдасарян, С. А. Багдасарян, В. И. Николаев, О. В. Кашенко, С. О. Николаева, Е. Р. Павлюкова // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 6. – С. 1–19.
5. Кривоногов, Л. Ю. Методы и алгоритмы помехоустойчивой обработки и электрокардиографической информации : дис. / Л. Ю. Кривоногов. – 2009.
6. Полторанина, О. А. Емкостные датчики для бесконтактной регистрации электрокардиограммы / О. А. Полторанина, И. А. Лежнина, А. А. Уваров // Томская конференция. – 2019.
7. Клаудиус, М. А. Упрощение процессов медицинских измерений с использованием беспроводных датчиков / М. А. Клаудиус, И. Ю. Чудовский // Журнал беспроводные технологии. – 2006. – № 2 (03). – С. 1–76.
8. Варма, Н. Контроль аритмий с помощью технологий мобильного здравоохранения: цифровые медицинские технологии для специалистов по сердечному ритму / Н. Варма, И. Цыганкевич, М. Турахия // Журнал российский кардиологический. – 2026. – Т. 1, № 1. – С. 1–62.
9. Сокольская, М. А. Опыт использования беспроводной системы “Spyder” для многосуточного мониторинга кардиограммы / М. А. Сокольская, В. А. Шварц, О. Л. Бокерия // Анналы Аритмологии. – 2024. – Т. 15, № 4. – С. 1–7.
10. Герасимова, Ю. В. Аппаратно-программная реализация беспроводного холтеровского мониторинга кардиосигнала сигнала с использованием миникомпьютера класса Raspberry / Ю. В. Герасимова, В. П. Ивель, С. С. Молдахметов, П. А. Петров // Динамика систем, механизмов и машин. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 1–5.
11. Баллюзек, М. Ф. Опыт унификации исследований ЭКГ покоя с использованием облачной технологии для их автоматической интерпретации и хранения в многопрофильной медицине / М. Ф. Баллюзек, Д. В. Бугагин, Н. Н. Морозова // Медицинский алфавит. – 2016. – Т. 1, № 5. – С. 1–85.
12. Козловская И. Л., Лопухова В. В., Булкина О. С., Карпова Ю. А. Телемедицинские технологии в кардиологии. Часть 1. Персональный телемониторинг электрокардиограммы в амбулаторной практике: выбор оптимального подхода // Доктор.Ру. – 2020. – № 19 (5). – С. 35–41.
13. Бруно, Гил. Беспроводная имплантируемая биоэлектроника с лактат-ферментом с прямым переносом электронов для выявления инфекции в области хирургического вмешательства в ортопедии / Бруно Гил, Томас А. Г. Холл, Дэвид М. Э. Фримен, Дамьен Минг // Биосенсоры и биоэлектроника. – 2024. – № 25 (2). – С. 1–25.
14. Шумин, Ван. Встроенный биполярный электрод с общим катодом для двухрежимного обнаружения

и визуализации РЭА / Шумин Ван, Тэнкай Ван, Цзэхуа Ван, Гэнцзюнь Лю // Биосенсоры и биоэлектроника. – 2024. – С. 265.

15. Атхаров, Н. Умная упаковка с одноразовыми беспроводными газовыми датчиками с поддержкой NFC для контроля порчи продуктов / Н. Атхаров, Хон Сок Ли, Д. Херрингтон // Датчики ACS. – 2024. – № 9 (12). – С. 6789–6799.

References

1. Fokin, S. Yu., Kirichek, R. V. Overview of medical applications, devices, and internet of things communication technologies. *Information Technologies and Telecommunications*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 67–80 (In Russ.).
2. Chestnov, O. P., Boytsov, S. A., Kulikov, A. A., Baturin, D. I. Mobile healthcare: global experience and prospects. *Preventive Medicine*, 2014, vol. 17, no. 4, pp. 3–10 (In Russ.).
3. Chu, Y. J., Lee, G. U., Moon, J. S. Chang, M. K. Application of non-contact sensors for health monitoring in hospital. *Section of Family and Primary Medicine*, 2024, vol. 11, no. 9, pp. 15–20 (In Russ.).
4. Bagdasaryan, A. S., Bagdasaryan, S. A., Nikolaev, V. I., Kashchenko, O. V., Nikolaeva, S. O., Pavlyukova, E. R. Wireless monitoring of biological signals of the human cardiovascular system. *Journal of Radioelectronics*, 2019, no. 6, pp. 1–19 (In Russ.).
5. Krivonogov L. Yu. *Methods and algorithms of noise-resistant processing and electrocardiographic information : scientific dissertation*, 2009 (In Russ.).
6. Poltoranina, O. A., Lezhnina, I. A., Uvarov, A. A. Capacitive sensors for contactless registration of electrocardiogram. *Tomsk conference*, 2019 (In Russ.).
7. Klaudius, M. A., Chudovsky, I. Yu. Simplification of medical measurement processes using wireless sensors. *Wireless Technologies Journal*, 2006, no. 2 (03), pp. 1–76 (In Russ.).
8. Varma, N., Tsygankevich, I., Turakhia, M. Arrhythmia control using mobile health technologies: digital medical technologies for heart rhythm specialists. *Russian Cardiology Journal*, 2026, vol. 1, no. 1, pp. 1–62 (In Russ.).
9. Sokolskaya, M. A., Shvarts, V. A., Bokeriya, O. L. Experience in using the “Spyder” wireless system for multi-day monitoring of the cardiogram. *Annals of Arrhythmology*, 2024, vol. 15, no. 4, pp. 1–7 (In Russ.).
10. Gerasimova, Yu. V., Ivel, V. P., Moldakhmetov, S. S., Petrov, P. A. Hardware and software implementation of wireless holter monitoring of a cardiosignal signal using a raspberry-class minicomputer. *Journal Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 1–5 (In Russ.).
11. Balluzek, M. F., Bugagin, D. V., Morozova, N. N. Experience in unifying resting ECG studies using cloud technology for their automatic interpretation and storage in multidisciplinary medicine. *Medical Alphabet*, 2016, vol. 1, no. 5, pp. 1–85 (In Russ.).
12. Kozlovskaya, I. L., Lopukhova, V. V., Bulkina, O. S., Karpova, Yu. A. Telemedicine technologies in cardiology. Part 1. Personal telemonitoring of electrocardiogram in outpatient practice: choosing the optimal approach. *Doctor.Ru*, 2020, no. 19 (5), pp. 35–41 (In Russ.).
13. Bruno, Gil, Thomas, A. G. Hall, David, M. E. Freeman, Damien, Ming Wireless implantable bioelectronics with direct electron transfer lactate enzyme for infection detection in the field of surgical intervention in orthopedics. *Biosensors and Bioelectronics*, 2024, no. 25 (2), pp. 1–25 (In Russ.).
14. Shuming, Wang, Tenkai, Wang, Zehua, Wang, Genjun, Liu. Integrated bipolar electrode with a common cathode for dual-mode detection and visualization of CEA. *Biosensors and Bioelectronics*, 2024, p. 265 (In Russ.).
15. Atharov, N., Hong, Seok Lee, Herrington, D. Smart packaging with disposable wireless NFC-enabled gas sensors for food spoilage control. *ACS Sensors*, 2024, no. 9 (12), pp. 6789–6799 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 22.04.2026; одобрена после рецензирования 14.05.2026; принята к публикации 16.05.2026.

The article was submitted 22.04.2026; approved after reviewing 14.05.2026; accepted for publication 16.05.2026.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. В журнале публикуются материалы на английском и русском языках по тематике, соответствующей утвержденным для журнала отраслям наук, группам специальностей.

2. В список соавторов работ включаются только те лица, которые внесли творческий вклад в подготовку представленных материалов. Лицам, оказавшим только техническую помощь, можно выразить благодарность в конце статьи. Один человек может быть автором (соавтором) не более чем двух статей в одном номере журнала, причем единственным автором он может быть только в одной статье.

3. Объем публикаций для научных статей должен быть не менее 8 страниц, а количество источников в библиографическом списке (списке литературы) – не менее 10 позиций.

4. Содержание каждой статьи должно включать следующие элементы: УДК; название статьи; сведения об авторах, включая их место работы, должность, адрес электронной почты; аннотацию объемом от 100 до 250 слов, ключевые слова (от 9 до 13); графическую аннотацию, отражающую содержание статьи; название статьи, сведения об авторах, аннотацию и ключевые слова на английском языке (для англоязычных статей – на русском языке); введение – оно должно заканчиваться формулировкой цели работы в явной форме; собственно текст статьи – очень желательна его сегментация на разделы, имеющие содержательные заголовки; выводы или заключение (должны соответствовать формулировке цели статьи).

5. Для русскоязычных статей приводится два библиографических списка: на языке оригинала статьи; список с транслитерацией русскоязычных источников на латиницу и (дополнительно) приведением в квадратных скобках переводов названий статей и названий источников на английский язык.

В «русскоязычном» библиографическом списке (списке литературы) порядок следования источников – по алфавиту фамилий авторов (сначала русскоязычные источники, потом иноязычные). На все источники, включенные в библиографический список, должны быть даны ссылки в тексте статьи в квадратных скобках. При необходимости авторы могут указывать номера страниц в источниках, на которые даются ссылки. Приветствуются ссылки на иноязычные источники, а также на материалы, опубликованные ранее в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии». Однако в последнем случае количество таких ссылок не должно превышать 20 % от общего количества источников, включенных в библиографический список. Для источников, имеющих DOI, целесообразно его указывать. При ссылках на статьи, опубликованные в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии», целесообразно в конце библиографического описания источника в круглых скобках указывать гиперссылку, указывающую на место размещения статьи на страничке сайта Астраханского государственного университета.

Ссылки в библиографическом списке на материалы, размещенные в интернете, допускаются при соблюдении следующих условий: если у материала, на который дается ссылка, имеется автор и/или название, то они должны быть указаны для этого источника; должен быть приведен полный маршрут доступа к источнику в интернете; должна быть указана дата обращения (доступа) к источнику.

Ограничения по списку литературы: доля самоцитирований для любого из авторов статьи, а также по совокупности всех авторов статьи, не должна превышать 25 %; доля ссылок на статьи с участием одного автора, не являющегося автором (соавтором) статьи, не должна превышать 25 %.

6. Суммарная доля таблиц и иллюстраций в общем объеме представляемой статьи не должна превышать 40 %. Под иллюстрациями понимаются следующие объекты: диаграммы; графики; рисунки; эскизы; фотографии; карты и т. п.

7. Доля оригинального текста в статьях (оцениваемого через систему «Антиплагиат» на сайте www.antiplagiat.ru) должна быть не менее 80 %.

8. Указание на то, что работа финансируется по какому-либо гранту, в рамках Федеральной целевой программы, государственного заказа и пр. дается в виде постраничной сноски после заголовка (названия) работы.

9. В сведения об авторах работ помимо места работы и должности целесообразно включать ORCID автора и гиперссылку на страничку с его личными наукометрическими показателями на сайте www.elibrary.ru. По желанию можно привести также ссылки на странички с наукометрическими показателями на Scopus, в ResearchGate; на личную страничку, размещенную на сайте организации.

10. Основные технические требования к оформлению статей (материалов):

10.1. Текст должен быть расположен по ширине страницы формата А4 с учётом полей (все поля по 2,5 см), набран шрифтом Times New Roman, кегль 12, межстрочный интервал 1,0. В таблицах, подрисуночных 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

**2026
№ 2 (74)**

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

Главный редактор А. М. Лихтер

Редактирование,
компьютерная правка, верстка *Н. Н. Сахно*

Дата выхода в свет 30.07.2026 г.

Цена свободная
Уч.-изд. 17,5. Усл. печ. л. 24,5.
Заказ № 4778. Тираж 500 экз. (первый завод – 23 экз.)

Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а
тел. (8512) 24-66-60 (доб. 3; издательско-полиграфический отдел)
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