

ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ

PROCEEDINGS IN CYBERNETICS

12+



**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

ТОМ 24, № 4

**Сургут
2025**

Учредитель и издатель
Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»

Главный редактор
Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор

Заместитель главного редактора
Тараканов Дмитрий Викторович, к. т. н., доцент

Ответственный секретарь
Брагинский Михаил Яковлевич, к. т. н., доцент

Члены редакционной коллегии:
Советов Б. Я., академик РАН и РАО, д. т. н., профессор
Юсупов Р. М., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор
Абрамов О. В., д. т. н., профессор
Анохин А. Н., д. т. н., профессор
Антонов А. В., д. т. н., профессор
Бурханов Р. А., д. филос. н., профессор
Бушмелева К. И., д. т. н., профессор
Гетман А. Ф., д. т. н., профессор
Григорьев Л. И., д. т. н., профессор
Древс Ю. Г., д. т. н., профессор
Ельников А. В., д. ф.-м. н., профессор
Инютин С. А., д. т. н., профессор
Каштанов В. А., д. ф.-м. н., профессор
Керимов Т. Х., д. филос. н., профессор
Крамаров С. О., д. ф.-м. н., профессор
Леонов Д. Г., д. т. н., профессор
Малышев Д. С., д. ф.-м. н., профессор
Мельников А. В., д. т. н., профессор
Певзнер Л. Д., д. т. н., профессор
Увайсов С. У., д. т. н., профессор
Цибульский В. Р., д. т. н., профессор
Юрков Н. К., д. т. н., профессор

Выпускающий редактор

Петрова М. А.

Редактор

Зелексон Л. А.

Верстка

Чорньего С. И.

Переводчик

Бенская М. О.

Рисунок на обложке:

Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
© Галкин В. А., Гореликов А. В.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук». С 29.03.2022 издание принимает к публикации статьи по следующим научным специальностям: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Эл № ФС77-83015 от 31.03.2022.

Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

БУ ВО «Сургутский государственный университет»,
628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1
Тел.: +7 (3462) 76-29-88, факс: +7 (3462) 76-29-29, email: proceed.cyber@mail.ru. Сайт: vestcyber.ru

Founder and Publisher
Surgut State University

Chief Editor

Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Sciences (Engineering)

Vice Chief Editor

Dmitry V. Tarakanov, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Executive Editor

Mikhail Ya. Braginsky, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Editorial Board:

Prof. Sovetov B. Ya., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
the Russian Academy of Education (RAE)

Prof. Yusupov R. M., Doctor of Sciences (Engineering),
member of the Russian Academy of Sciences (RAS)

Prof. Abramov O. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Anokhin A. N., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Antonov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Bushmeleva K. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Getman A. F., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Drevs Yu. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Elnikov A. V., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Inyutin S. A., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Kramarov S. O., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Leonov D. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Malyshev D. S., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Melnikov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Pevzner L. D., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Yurkov N. K., Doctor of Sciences (Engineering)

Publishing Editor

Petrova M. A.

Editor

Zelexson L. A.

Layout

Chornenkiy S. I.

Translator

Benskaya M. O.

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere

© Galkin V. A., Gorelikov A. V.

Since March 29, 2017, the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals of the Higher Attestation Commission, which publishes main scientific results of Doctor's and Candidate's theses.

Since March 29, 2022, the journal is included in the List on the following subject groups:

- 2.3.1. System Analysis, Data Management and Processing; 1.2.2. Mathematical Modeling, Calculus and Program Complexes;
2.2.2. Electronic Component Base of Micro- and Nanoelectronics, Quantum Devices.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Mass media registration certificate EI No. FS77-83015 of March 31, 2022.

Published since 2002. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

Surgut State University, Russia, 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, Surgut, Lenina pr., 1

Tel.: +7 (3462) 76-29-88, fax: +7 (3462) 76-29-29, email: proceed.cyber@mail.ru. Web: vestcyber.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Алиев М. У.

Опыт российских организаций по внедрению искусственного интеллекта в защиту информационных ресурсов 6

Гордова А. А., Прутский А. С.

Синтезирование методов локализации и одометрии для задач позиционирования мобильных роботов в закрытом пространстве..... 13

Гусев О. В.

Высоковольтный генератор барьерных разрядов: моделирование и экспериментальная проверка..... 21

Дубанов А. А., Болоев П. А.

Оптимальное распределение дронов в групповом преследовании целей при реализации венгерского алгоритма в системе компьютерной математики..... 35

Зорькин Д. Ю., Асанова Н. В.

Обсуждение основных положений информационной системы учета транспортных средств и дорожно-транспортных происшествий 41

Метёлкин А. В., Поликарпов И. А.

Моделирование частотных свойств магнитоэлектрических структур..... 50

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Балакирев Н. Е., Сергеев И. С., Коновалов К. А.

Комплексное решение многоуровневой стратегии защиты программных средств обработки акустической информации..... 58

Ельников А. В., Логинов В. А.

К вопросу пространственных автокорреляционных функций 73

Ткаченко С. Н., Кривогузова А. С., Шпилевой А. А.

Математическое моделирование модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока на максимальных оборотах 80

CONTENTS

ENGINEERING

<i>Aliev M. U.</i> Artificial intelligence implementation in data protection of Russian companies	6
<i>Gordova A. A., Prutskii A. S.</i> Synthesis of localization and odometry for positioning mobile robots in enclosed space	13
<i>Gusev O. V.</i> A high-voltage barrier discharge generator: Modeling and experimental verification	21
<i>Dubanov A. A., Boloev P. A.</i> Optimal allocation of drones in group target pursuit implementing the Hungarian algorithm in a computer algebra system	35
<i>Zorkin D. Yu., Asanova N. V.</i> Main provisions discussion of the information system for vehicles and road traffic accidents registration	41
<i>Metelkin A. V., Polikarpov I. A.</i> Frequency properties modeling of magnetoelectric structures	50

PHYSICS AND MATHEMATICS

<i>Balakirev N. E., Sergeev I. S., Konovalov K. A.</i> Comprehensive approach to multi-layered protection strategy of acoustic information processing software.....	58
<i>Elnikov A. V., Loginov V. A.</i> Revisiting the spatial autocorrelation functions.....	73
<i>Tkachenko S. N., Krivoguzova A. S., Shpilevoi A. A.</i> Mathematical modeling of modernized brushless direct current motor working at maximum speed.....	80

Научная статья

УДК 004.056.5:004.8(470+571)

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-1>



Опыт российских организаций по внедрению искусственного интеллекта в защиту информационных ресурсов

Магомед Умарович Алиев

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

Аннотация. В данной статье анализируется, как технологии искусственного интеллекта применяются в области кибербезопасности, причем особый фокус сделан на практику российских компаний. В центре внимания исследования – решения на базе искусственного интеллекта для выявления угроз, сканирования уязвимостей и автоматизации задач по защите информационных активов. Главная цель – разобрать реальные примеры использования искусственного интеллекта в этой сфере и дать оценку его практической пользе.

В рамках работы рассматриваются такие важные направления, как выявление аномальной активности, борьба с фишингом и автоматизация реагирования на киберинциденты. Кроме того, приводится разбор конкретных примеров из опыта крупных российских игроков, например ПАО «Сбербанк» и ПАО «Ростелеком». Методологическую основу составил анализ открытых источников: публикаций, отчетов и кейсов. Авторский вклад заключается в том, чтобы выделить именно российскую специфику внедрения искусственного интеллекта, что позволяет увидеть уникальные особенности и вызовы, характерные для локального рынка.

Новизна исследования состоит в обобщении разрозненного опыта по применению искусственного интеллекта в кибербезопасности в России и в определении ключевых преимуществ и трудностей этого процесса. По итогам работы описаны успешные внедрения в банковском секторе, телекоммуникационной отрасли и госструктурах. Автор приходит к выводу, что искусственный интеллект существенно повышает эффективность защиты, однако одновременно порождает и новые сложности, такие как ложные срабатывания и этические дилеммы. Перспективы дальнейшей работы видятся в углублении автоматизации и более тесной интеграции интеллектуальных систем в контуры безопасности.

Ключевые слова: искусственный интеллект, кибербезопасность, защита данных, Сбербанк, российские компании

Для цитирования: Алиев М. У. Опыт российских организаций по внедрению искусственного интеллекта в защиту информационных ресурсов // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 6–12. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-1>.

Original article

Artificial intelligence implementation in data protection of Russian companies

Magomed U. Aliev

Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. The article examines the application of artificial intelligence in cybersecurity, focusing on the experience of Russian companies. The study analyzes artificial intelligence technologies used for threat detection, vulnerability assessment, and automation of information assets protection processes. The aim of the article is to evaluate practical implementations of artificial intelligence in cybersecurity and assess its effectiveness.

The research explores key areas including abnormal activity detection, phishing attack prevention, and incident response automation while examining case studies from major Russian corporations such as Sberbank and Rostelecom. The methodology relies on the analysis of open data, publications, and reports. The author's

approach emphasizes the Russian context, revealing unique aspects and challenges of artificial intelligence adoption in local cybersecurity practices.

The novelty of the research lies in summarizing the data on artificial intelligence applications in the Russian cybersecurity and identifying its key benefits and challenges. The results of the study demonstrate successful artificial intelligence implementations in banking, telecommunications, and government sectors. While confirming significant improvements in cybersecurity effectiveness through artificial intelligence, the research also highlights persistent issues such as false positives and ethical concerns. Future research directions include automation advances and closer integration of artificial intelligence technologies into cybersecurity systems.

Keywords: artificial intelligence, cybersecurity, data protection, Sberbank, Russian companies

For citation: Aliev M. U. Artificial intelligence implementation in data protection of Russian companies. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):6–12. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-1>.

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху цифровой трансформации обеспечение безопасности информационных систем становится одной из приоритетных задач для корпоративных и государственных структур. Наблюдается устойчивый рост числа кибератак при одновременном усложнении методов их осуществления, что приводит к снижению эффективности традиционных средств защиты данных. В этих условиях искусственный интеллект (ИИ) выступает как перспективный инструмент, способный не только обнаруживать угрозы в режиме реального времени, но и прогнозировать потенциальные риски, обеспечивая проактивную защиту [1].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью глубокого анализа опыта российских компаний, где внедрение ИИ в кибербезопасность сопровождается уникальными локальными особенностями и вызовами [2, 3]. Цель настоящей работы состоит в рассмотрении практических примеров использования ИИ в кибербезопасности на российском рынке, оценке его эффективности и выявлении ключевых технических и этических проблем, возникающих при внедрении данных технологий.

Рабочая гипотеза предполагает, что ИИ способен значительно повысить уровень защиты информации за счет способности к самообучению и выявлению аномалий, однако успешное применение требует комплексного решения сопутствующих задач [4, 5]. Несмотря на активное изучение применения ИИ

в кибербезопасности в зарубежных исследованиях, российский контекст остается недостаточно исследованным, особенно в части интеграции ИИ в локальные информационные системы и оценки его эффективности в специфических условиях отечественного рынка [6, 7].

Данное исследование направлено на устранение указанных пробелов. В статье анализируются кейсы внедрения ИИ в банковском секторе, телекоммуникациях и государственных структурах, а также систематизируются преимущества и проблемы, связанные с использованием ИИ в российской практике кибербезопасности [8, 9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленной задачи в исследовании были использованы данные из открытых источников, включая отчеты компаний, публикации в профессиональных изданиях и аналитические материалы. Основными объектами исследования выступили российские компании, активно внедряющие технологии ИИ в системы кибербезопасности, такие как Сбербанк, Ростелеком и государственные структуры. Выбор данных организаций обусловлен их лидирующими позициями в области применения инновационных технологий и доступностью информации об их практическом опыте [8].

Методология исследования включала несколько этапов. Первый этап начался с анализа публикаций и отчетов, которые посвящены

опыту российских компаний использования ИИ-моделей в сетевой безопасности [2, 6, 7, 10]. После данного этапа были выделены основные направления использования данной технологии. На следующем этапе исследования было углубленное изучение уже конкретных примеров использования данных моделей в выбранных компаниях [8, 9]. Больше внимание уделялось специфике применяемых технологических решений, оценке их эффективности на практике и тех трудностях, с которыми столкнулись данные организации в процессе внедрения. Методологическую основу на этом этапе составили качественные методы, а именно сравнительный анализ и систематизация данных [5].

Стоит, однако, отметить и определенное ограничение, которое присуще данной работе. Поскольку исследование опиралось в основном на сведения из открытых источников, глубина и полнота анализа в большей степени зависят от объема и достоверности информации в публичном поле. Также стоит отметить, что некоторые аспекты внедрения ИИ, такие как внутренние алгоритмы и техническая специфика, остаются недоступными для публичного изучения [7]. В связи с этим в работе были учтены экспертные оценки и доступная информация, что позволило сделать обоснованные выводы.

Выбор методов исследования обусловлен необходимостью сочетания теоретического анализа и практических примеров [5]. Это позволяет не только обобщить накопленный опыт использования ИИ в кибербезопасности, но и выявить особенности его применения в российских условиях [2, 6]. Результаты исследования представлены в виде систематизированного анализа, который может быть использован для дальнейшего изучения данной темы.

Применение ИИ в информационной безопасности охватывает широкий спектр задач, направленных на повышение эффективности защиты данных и инфраструктуры организаций [6, 5]. К основным направлениям использования ИИ в данной сфере относятся:

Обнаружение и предотвращение угроз. Современные антивирусные решения и системы мониторинга сетевого трафика используют ИИ для анализа поведения файлов, процессов и сетевых соединений. Это позволяет выявлять новые, ранее неизвестные вредоносные программы, включая вирусы, трояны и майнеры, а также предотвращать их распространение [5, 7].

Противодействие фишингу и социальной инженерии. ИИ-технологии анализируют поведенческие паттерны пользователей, отслеживают аномалии в их действиях, а также осуществляют анализ электронной почты на предмет наличия поддельных ссылок и вложений. Такие системы способны выявлять фишинговые атаки и поддельные аккаунты, минимизируя риск компрометации данных [4, 6].

Анализ уязвимостей. Искусственный интеллект применяется для выявления уязвимостей в программном обеспечении и сетевых устройствах. На основе анализа больших объемов данных ИИ способен прогнозировать, какие компоненты инфраструктуры наиболее подвержены атакам, оценивать уровень их критичности и приоритизировать устранение выявленных угроз [5, 6].

Автоматизация реагирования на инциденты. ИИ обеспечивает автоматическую блокировку подозрительных IP-адресов, пользователей и устройств, а также интеграцию с другими системами безопасности для координации ответных мер на кибератаки. Кроме того, ИИ формирует отчеты об инцидентах, что значительно облегчает работу специалистов по безопасности [4, 7].

В банковском секторе ИИ проводит анализ транзакций, платежей и переводов для обнаружения подозрительных операций. Это позволяет своевременно предотвращать финансовые потери [4, 8].

Таким образом, ИИ становится важным инструментом в обеспечении информационной безопасности. Он не только помогает оперативно реагировать на современные угрозы, но и прогнозировать их развитие. Кроме того,

он автоматизирует значительную часть процессов защиты [4, 7, 5].

Примеры использования ИИ в российских компаниях в среде информационной безопасности

Сбербанк является одним из крупнейших банков в России, который активно внедряет технологии искусственного интеллекта для защиты своих клиентов и внутренних систем. Например, система банка анализирует транзакции в реальном времени и, если обнаруживает подозрительную, она может остановить транзакцию и запросить подтверждение у клиента дополнительными методами. Это позволит минимизировать шанс проведения мошеннической операции [8].

Также Сбербанк использует ИИ, чтобы анализировать поведение клиента. Если система замечает отклонения от привычных паттернов, она также может запросить дополнительную аутентификацию [4, 8].

Ростелеком – крупнейший оператор связи в России, который также активно применяет ИИ для защиты своей экосистемы и клиентов. Проводит мониторинг сетевого трафика и помогает в выявлении аномалий, как, например, необычно высокая нагрузка на серверы или подозрительные запросы [7]. А для защиты от кибератак использует технологии ИИ для анализа устройств и программное обеспечение в своей экосистеме, чтобы знать, какие части структуры могут стать целью для атаки, и заранее защитить их [6, 9].

Государственные структуры РФ [1] не стали исключением и также активно используют и внедряют технологии искусственного интеллекта для защиты своей инфраструктуры. Например, в мониторинге государственных информационных систем и порталов на предмет несанкционированного доступа к данным системам.

Важнейшим проектом является анализ больших данных. Данный проект требует больших затрат, а главное, мощностей для работы ИИ. Анализируя большое количество данных, ИИ умеет находить нарушителей, используя не только личные данные, но и полученные изображения (например, с дорожных

или уличных камер). Такие технологии активно внедряют в системы Государственной инспекции безопасности дорожного движения, Налоговой инспекции, Федеральной службы безопасности [5, 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования были получены следующие результаты, подтверждающие рабочую гипотезу о том, что ИИ способен существенно повысить уровень кибербезопасности; однако его внедрение сопряжено с рядом вызовов.

1. Способность обнаружения угроз в автоматическом режиме и предотвращение. Исследование продемонстрировало, что ИИ успешно справляется с задачей выявления аномалий в сетевом трафике. Например, в Сбербанке благодаря внедрению систем с использованием искусственного интеллекта удалось заметно уменьшить количество успешных фишинговых атак и защитить данные в автоматическом режиме. Это стало возможным благодаря обработке большого объема данных, анализу поведения пользователей и блокировке подозрительных операций в режиме реального времени. А в компании «Ростелеком» внедрение искусственного интеллекта для мониторинга сетевого трафика позволило существенно снизить время реагирования на разного рода инциденты и предоставлять специалистам подробные описания произошедших событий. Еще один пример – опыт государственных структур. В государственном секторе РФ алгоритмы искусственного интеллекта находят применение для обработки значительных массивов информации в режиме реального времени. Данный метод позволяет осуществлять мониторинг киберугроз на уровне государственных информационных систем.

2. Автоматизация рутинных операций. Проведенный анализ продемонстрировал, что внедрение интеллектуальных систем способствует автоматизации рутинных процессов. Таким образом, ИИ берет на себя выполнение стандартных задач, что в итоге позволяет разгрузить специалистов по кибербезопасности

и сконцентрироваться им на более сложных вопросах.

3. Анализ рисков и киберинцидентов. Ключевым достоинством современных систем ИИ является их способность проводить оценку рисков и прогнозировать потенциальные угрозы. Эта функция реализуется за счет комплексного анализа больших данных в реальном времени, при этом одновременно выявляя паттерны и закономерности в исторических записях.

4. Проблемы внедрения и дальнейшей эксплуатации ИИ. Несмотря на то что при внедрении данных моделей есть очевидные преимущества, исследование выявило ряд серьезных препятствий на пути интеграции ИИ.

– Ложные срабатывания. Система может ошибочно классифицировать легитимную операцию как мошенническую и заблокировать ее, что позднее создает операционные сложности.

– Дефицит качественных данных. Чтобы эффективно обучить модель, в большинстве случаев не хватает репрезентативных и проверенных данных.

– Этические аспекты. Наиболее сложной проблемой являются этические дилеммы, возникающие при использовании ИИ для обработки персональных данных.

Что касается развития ИИ в России, то сейчас этот процесс находится в активной фазе. Результаты работы подтверждают, что ИИ служит действенным инструментом для укрепления кибербезопасности. Тем не менее для его успешного применения требуется преодоление не только технических, но и организационных, и нормативных барьеров. В частности, актуальной задачей является развитие инфраструктуры для сбора и обработки данных а также формирование четкой законодательной базы, регулирующей применение интеллектуальных систем.

Анализ результатов показал, что ИИ-систем имеет больше преимуществ, чем использование традиционных методов и систем [6].

Ключевые преимущества использования ИИ:

1. Высокая скорость обработки данных. Мощностей у ИИ хватает, чтобы провести ана-

лиз больших данных в реальном времени и реагировать на события быстрее человека [7].

2. Более высокая точность при выявлении угроз в возникающих событиях. Методика машинного обучения способна выявлять больше сложных и скрытых угроз для инфраструктуры, нежели традиционные системы [4, 6].

3. Выполнение части рутинных задач в автоматическом режиме. Системы ИИ могут брать на себя типовые и рутинные задачи, тем самым освобождая специалистов информационной безопасности для решения более сложных задач [4, 7].

Сложности при внедрении систем с использованием ИИ:

1. Нехватка данных высокого качества. Для полноценного и хорошего обучения системы и эффективного функционирования необходимо проводить машинное обучение с использованием не просто больших данных, а структурированных данных хорошего качества. Сложность тут в том, что такие данные не всегда доступны [2, 4].

2. Неправильные срабатывания на события. ИИ может ошибочно классифицировать легитимные действия как угрозы, что приводит к блокировке законных операций и увеличивает нагрузку на специалистов по безопасности [4, 7].

3. Этические и правовые вопросы. Использование ИИ для анализа пользовательских данных вызывает обеспокоенность в отношении конфиденциальности и защиты персональной информации, а также требует разработки нормативно-правового регулирования [3].

Таким образом, несмотря на очевидные преимущества, успешное внедрение ИИ в кибербезопасность требует комплексного подхода к решению технических, организационных и этических задач, а также развития инфраструктуры для сбора и обработки данных [2, 4, 6, 7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная тенденция развития систем показывает, что искусственный интеллект получает большой толчок в развитии и все больше применяется в крупных компаниях

для решения определенных задач, в частности в сфере кибербезопасности. Опыт же России показывает, что ИИ-модели могут быть отличными помощниками не только в крупных компаниях, но и в государственных ведомствах РФ. Данные системы уже на данном этапе на очень высоком уровне справляются с задачами по информационной безопасности, защитой личных данных, критически важной инфраструктуры, оборудования и защитой от кибератак.

Несмотря на некоторые проблемы и ограничения при внедрении систем с использованием искусственного интеллекта, данные системы проявили себя очень перспективными и уже сейчас показывают результат выше, чем традиционные системы безопасности.

Проведя данное исследование, получил результат, по которому была подтверждена рабочая гипотеза о том, что внедрение и использование ИИ-систем и моделей способно

значительно повысить уровень защищенности систем и данных.

При этом были выявлены проблемы, с которыми столкнулись перечисленные компании. Среди них одной из главных является малое количество качественных проверенных данных, с помощью которых можно обучить систему.

Но все ограничения и трудности, с которыми столкнулись данные компании, вполне решаемы и успешное внедрение и использование систем с искусственным интеллектом вполне реалистично при условии выполнения организационных и нормативных задач.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка методов повышения точности ИИ-систем, совершенствование механизмов защиты персональных данных, а также создание нормативно-правовой базы для регулирования использования ИИ в кибербезопасности.

Список источников

1. Минцифры России. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года. Утв. Указом Президента РФ от 10.10.2019 г. № 490. URL: <https://digital.gov.ru/documents/ukaz-prezidenta-rossijskoj-federaczi-%e2%84%96-490> (дата обращения: 01.07.2025).
2. Пантелеева Т. А. Возможности и угрозы использования искусственного интеллекта в бизнес-форсайте российских компаний // Проблемы рыночной экономики. 2021. № 1. С. 131–148.
3. Журков А. А. Этические аспекты использования систем искусственного интеллекта: международно-правовой опыт // Вестник Университета имени О. Е. Кутафина (МГЮА). 2022. Т. 4, № 92. С. 186–194.
4. Саламатова Т. А., Жуков В. Г. О применении алгоритмов искусственного интеллекта в системах обнаружения вторжений // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 1. С. 503–505.
5. Намиот Д. Е., Ильюшин Е. А., Чижов И. В. Искусственный интеллект и кибербезопасность // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10, № 9. С. 135–147.
6. Намиот Д. Е., Сухомлин В. А. О кибербезопасности систем Интернета Вещей // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11, № 2. С. 85–97.
7. Намиот Д. Е. Схемы атак на модели машинного обучения // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11, № 5. С. 68–86.

References

1. Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation. National Strategy for the Development of Artificial Intelligence until 2030. Adopted by Presidential Decree No. 490 dated October 10, 2019. URL: <https://digital.gov.ru/documents/ukaz-prezidenta-rossijskoj-federaczi-%e2%84%96-490> (accessed: 01.07.2025). (In Russ.).
2. Panteleeva T. A. Opportunities and threats of using artificial intelligence in business foresight of Russian companies. *Problems of Market Economy*. 2021;(1):131–148. (In Russ.).
3. Zhurkov A. A. Ethical aspects of the use artificial intelligence systems: International legal experience. *Courier of Kutafin Moscow State Law University (MSAL)*. 2022;4(92):186–194.(In Russ.).
4. Salamatova T. A., Zhukov V. G. The application of artificial intelligence algorithms in intrusion detection systems. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki*. 2015;1:503–505. (In Russ.).
5. Namiot D. E., Ilyushin E. A., Chizhov I. V. Artificial intelligence and cybersecurity. *International Journal of Open Information Technologies*. 2022;10(9):135–147. (In Russ.).
6. Namiot D. E., Sukhomlin V. A. On cybersecurity of the Internet of Things systems. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023;11(2):85–97. (In Russ.).
7. Namiot D. E. Schemes of attacks on machine learning models. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023;11(5):68–86. (In Russ.).

8. В чём сила, бот? Как применяют искусственный интеллект // «СберБизнес». URL: https://www.sberbank.ru/ru/s_m_business/pro_business/iskusstvennyj-intellekt-v-biznese-opyt-rossijskih-kompanij (дата обращения: 05.07.2025).
9. Годовой отчет 2023 // «Ростелеком». URL: https://www.company.rt.ru/ir/agm/files/2023/02_Annual_report_2023_rus_abridged.pdf (дата обращения: 01.07.2025).
10. Кузовкова Т. А., Шаравова М. М., Катунин Д. А. Анализ перспектив развития искусственного интеллекта // Экономика и качество систем связи. 2024. Т. 1, № 31. С. 41–47.
8. V chyom sila, bot? Kak primenyayut iskusstvennyy intellekt. *Sberbizness*. URL: https://www.sberbank.ru/ru/s_m_business/pro_business/iskusstvennyj-intellekt-v-biznese-opyt-rossijskih-kompanij (accessed: 05.07.2025). (In Russ.).
9. Annual Report 2023. Rostelecom. URL: https://www.company.rt.ru/ir/agm/files/2023/02_Annual_report_2023_rus_abridged.pdf (accessed: 01.07.2025). (In Russ.).
10. Kuzovkova T. A., Sharavova M. M., Katunin D. A. Analysis of the prospects for the development of artificial intelligence. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*. 2024;1(31):41–47. (In Russ.).

Информация об авторе

М. У. Алиев – ассистент;
<https://orcid.org/0009-0001-0081-419X>,
aliev_mu@surgu.ru

About the author

M. U. Aliev – Assistant;
<https://orcid.org/0009-0001-0081-419X>,
aliev_mu@surgu.ru

Научная статья

УДК 621.865.8-182.3

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-2>



Синтезирование методов локализации и одометрии для задач позиционирования мобильных роботов в закрытом пространстве

Анна Алексеевна Гордова[✉], **Алексей Сергеевич Прутский**
Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

Аннотация. Позиционирование робототехнических систем является ключевым аспектом разработки и функционирования автономных роботов. Эта тема охватывает множество аспектов, таких как навигация, восприятие среды, обработка данных и планирование движения. Решение задачи определения местоположения робота в пространстве представляется обязательным этапом в создании любой мобильной робототехнической системы. Эффективное позиционирование позволяет роботам точно определять свое местоположение в пространстве и относительно окружающих предметов, что критически важно для выполнения ими различных манипуляций. Современные подходы к позиционированию включают использование многих видов сенсоров и технологий, таких как инерциальные измерительные устройства, камеры и лазерные дальномеры. Интеграция различных источников данных позволяет не только повысить точность, но и обеспечить надежность систем позиционирования в условиях, где один из видов датчиков может давать сбой. В данной статье анализируются наиболее распространенные методы локального позиционирования объекта без применения технологии глобального позиционирования. Рассматриваются способы их комбинирования и интеграции с целью получения более точных и надежных результатов локализации в окружающем пространстве. В частности, приведено решение задачи оптимальной нелинейной фильтрации с использованием расширенного фильтра Калмана. Выполнен сравнительный анализ достоинств и недостатков наиболее распространенных подходов к локализации местоположения робота, определен рекомендуемый механизм достижения максимальной точности решения задачи позиционирования.

Ключевые слова: робототехника, позиционирование, одометрия, инерциальное измерительное устройство (IMU), лазерное сканирование, лазерный дальномер (LiDAR), итеративный алгоритм ближайших точек (ICP), фильтр Калмана, комплексирование

Для цитирования: Гордова А. А., Прутский А. С. Синтезирование методов локализации и одометрии для задач позиционирования мобильных роботов в закрытом пространстве // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 13–20. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-2>.

Original article

Synthesis of localization and odometry for positioning mobile robots in enclosed space

Anna A. Gordova[✉], **Alexei S. Prutskii**
Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation

Abstract. The positioning of robotic systems is a key aspect of the development and operation of autonomous robots. This topic covers many points, such as navigation, perception of the environment, data processing, and motion planning. The determination of the robot's position in space is an essential step in the creation of any mobile robotic system. Effective positioning allows robots to identify their exact location in space and relative to surrounding objects, which is crucial for performing various procedures. Modern positioning approaches include the use of many kinds of sensors and technologies, such as inertial measurement units, cameras, and laser rangefinders. The integration of diverse data sources allows not only to increase accuracy but also to ensure the reliability of positioning systems in conditions where one type of sensor may malfunction. This article analyzes common approaches to local object positioning, omitting global positioning technology. The process of combining and in-

tegrating the specified methods is assessed to enhance the accuracy and dependability of localization results within the surrounding area. Specifically, a solution is provided for the optimal non-linear filtration problem, which employs an extended Kalman filtering approach. A comparative analysis of the advantages and disadvantages of the most common approaches in defining the robot's location is performed, and a recommended mechanism for achieving maximum accuracy in carrying out the positioning task is determined.

Keywords: robotics, positioning, odometry, inertial measurement unit (IMU), laser scanning, light detection and ranging (LiDAR), iterative closest point (ICP), Kalman filtering, sensor fusion

For citation: Gordova A. A., Prutskii A. S. Synthesis of localization and odometry for positioning mobile robots in enclosed space. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):13–20. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-2>.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием информационных технологий позиционирования объектов их применение в мобильных системах стало одной из основных задач робототехники. Позиционирование робототехнических систем является ключевым аспектом функционирования автономных роботов. Мобильные системы широко используются в любой сфере производства, промышленности, сфере услуг и многих других. Мобильные роботы могут заменить людей при выполнении сложных задач в опасных условиях, снизить производственные риски для человека и обеспечить его безопасность [1]. Способность робота точно определять свое местоположение, в том числе относительно окружающих предметов, является обязательным условием выполнения подобных задач. Большое значение имеет выбор алгоритмов для определения местоположения робота. Современные подходы к позиционированию включают в себя использование различных технологий, например одометрию, а также применение разнообразных типов сенсоров, таких как инерциальное измерительное устройство (IMU), камера и лазерный дальномер (LiDAR).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Одометрия, задачи и методы позиционирования. Для того чтобы раскрыть понятие одометрии, рассмотрим пример. Пусть определенный робот, оснащенный двумя парами колес одинакового диаметра, переместился вперед на некоторое расстояние. Зная радиус колеса и число его оборотов, несложно вычислить длину пройденного пути. Для того чтобы вычислить число оборотов, необходим фиксирующий датчик. Таким образом, мы имеем модель

процесса, использующего показания датчиков движения для расчета изменения положения в пространстве. Использование этих данных с целью дальнейших подсчетов пройденного расстояния называется одометрией [2].

Данные одометрии робота необходимы для решения задачи локализации (позиционирования) робота в пространстве, то есть определения координат его местоположения в некоторой системе отсчета.

Методы позиционирования делятся на три группы [3]:

- 1) методы счисления пути;
- 2) позиционные;
- 3) обзорно-сравнительные.

Счислением пути называется метод определения текущего местоположения (координат) объекта, основанный на вычислении пройденного пути относительно известного начального положения объекта и направления движения. К системам, реализующим методы счисления пути, относятся, например, инерциальные навигационные системы, одометры, гироскопы. Позиционные методы основаны на определении местоположения объекта путем засечек, представляющих собой точку пересечения двух или более линий (поверхностей) положения относительно известных ориентиров. Такие методы требуют наличие инфраструктуры в виде радиомаяков или иных средств информационного обеспечения позиционирования (примером могут послужить системы GPS, Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС)). Обзорно-сравнительные методы основаны на определении структуры какого-либо физического поля. Необходимо выполнить

сравнение параметров этого поля с параметрами, введенными в запоминающие устройства навигационных систем [3].

Применяемые методы позиционирования объекта определяются набором датчиков робота. На первый взгляд может показаться, что одометрии с использованием системы GPS будет достаточно, чтобы решить задачу локализации, однако значение минимальной погрешности в этом случае будет порядка одного метра [4]. Ею можно пренебречь на открытых пространствах, однако в условиях помещений (закрытого пространства) данная погрешность является существенной. Отсюда следует невозможность применения систем, подобных GPS или ГЛОНАСС. Решением этой проблемы является применение методов позиционирования и одометрии, в основе которых лежат другие датчики входной информации. Наиболее часто используются IMU и LiDAR, речь о которых пойдет далее.

Колесная одометрия. Приведем пример расчетных формул колесной одометрии, которая лежит в основе методов позиционирования, основанных на счислении пути. Будем считать, что робот оснащен датчиком IMU. Информация с него включает в себя данные с акселерометров (измерения линейного ускорения по каждой оси) и гироскопов (измерения частоты вращения объекта или угловой скорости

вокруг каждой оси). Кроме этого, измеряется скорость вращения колес, углы крена, тангажа и рыскания. Будем считать, что конструкция ходовой составляющей робота представляет собой двухколесный дифференциальный привод (рис. 1). Для расчета положения робота в пространстве с использованием информации о движении колес необходимо определить две системы координат: глобальную неподвижную с центром в точке нахождения робота в начальный момент времени и относительную (подвижную) систему координат, центр которой связан с самим роботом [5]. В рамках модели будем считать робота материальной точкой.

Определим необходимые данные с IMU и энкодеров на колесах:

- 1) v_L – скорость вращения левого колеса;
- 2) v_R – скорость вращения правого колеса;
- 3) yaw – угол рыскания.

Также считаем известными интервал времени dt , с которым производятся два последовательных измерения IMU-датчиком, и координаты робота x_{prev} , y_{prev} в глобальной системе координат, высчитанные на предыдущей итерации. В начальный момент времени они равны нулю.

Тогда новые координаты x_{new} , y_{new} положения робота в пространстве считаются по формулам (1), где v – усредненное значение скоростей на левом и правом колесе [6, 7]:

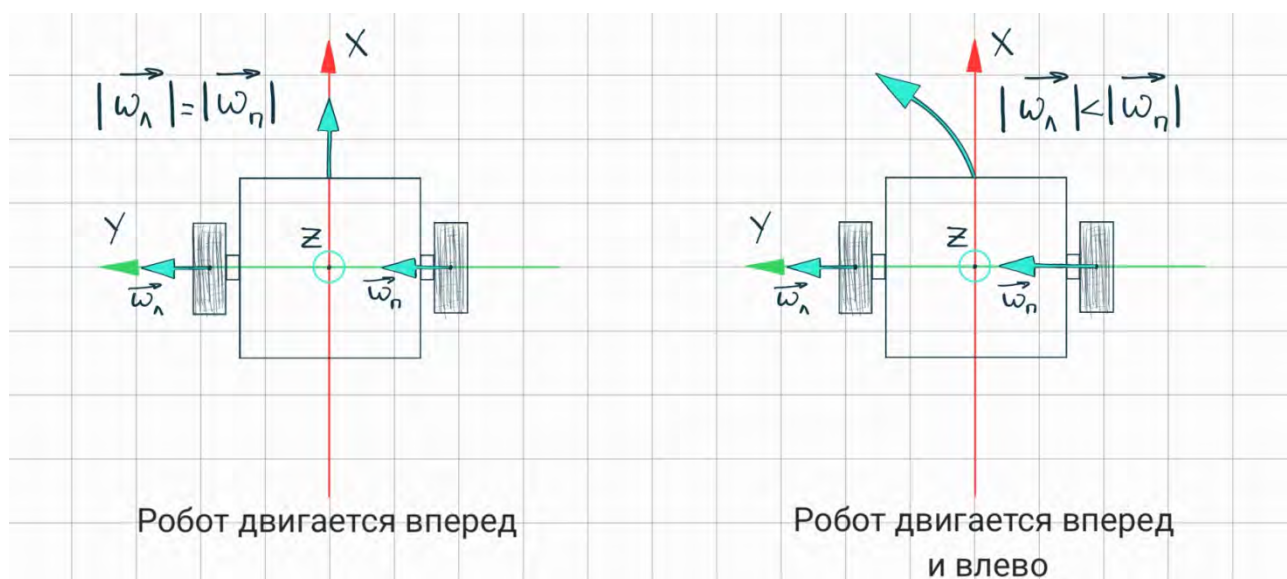


Рис. 1. Двухколесный дифференциальный привод (ω_L – угловая скорость вращения левого колеса, ω_R – угловая скорость вращения правого колеса)

Примечание: составлено авторами.

$$v = \frac{v_L + v_R}{2};$$
$$x_{new} = x_{prev} + v \cos(\text{yaw})dt; \quad (1)$$
$$y_{new} = y_{prev} + v \sin(\text{yaw})dt.$$

Обратив внимание на формулы (1), можно заметить, что методы счисления пути обладают существенным недостатком – накоплением ошибки с течением времени. Эти ошибки могут быть компенсированы при помощи специальных маркеров, точной калибровки параметров в формулах (1), нейросетевых алгоритмов компенсации ошибок [8, 9].

Лазерная одометрия. Поступающая с LiDAR-а информация представляет собой группу точек на плоскости в виде совокупности пар евклидовых норм и полярных углов радиус-векторов. Преимущество его использования заключается в простой обработке входной информации по следующей схеме: LiDAR посылает поток излучения, с этого момента ведется отсчет времени возвращения отраженного от препятствия на пути луча. Используя элементарный физический принцип распространения потока частиц в среде, можно вычислить расстояние до объекта. Полученный набор данных носит название «Облако точек» [10]. Пример его визуализации для помещения П-образной формы приведен на рис. 2.

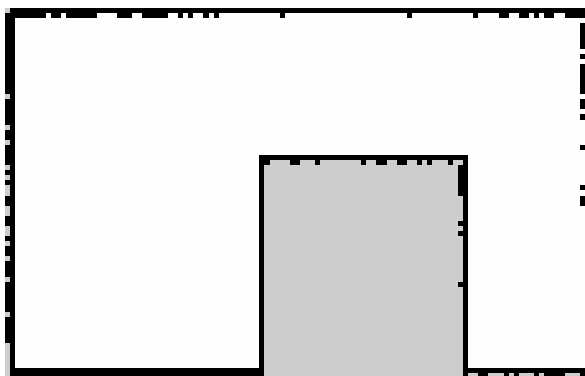


Рис. 2. Визуализация данных с LiDAR в П-образном помещении (белый цвет – свободное пространство, черный – препятствие, серый – неизвестная область)

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в результате исследования.

Алгоритмы локализации, в основе которых лежит лазерная одометрия, относятся к об-

зорно-сравнительным методам позиционирования. В основе самых популярных методов лазерной одометрии лежит итеративный алгоритм ближайших точек (Iterative Closest Point – ICP). Впервые он был представлен в 1992 г. [11] и с тех пор получил множество модификаций [12, 13].

ICP алгоритм сравнивает два облака точек, полученных в последовательные моменты времени. Цель этого алгоритма – найти такие матрицу поворота и вектор сдвига, чтобы совместить первое облако точек со вторым. Для этого необходимо найти соответствия между точками двух облаков решить оптимизационную задачу. Накопление получаемых векторов смещения и матриц вращения для ряда облаков точек, полученных в последовательные моменты времени, содержат информацию о перемещении робота в пространстве. На рис. 3 тройкой векторов обозначен робот, синие точки определяют контур помещения, в котором он расположен. Данный рисунок иллюстрирует отслеживание перемещения робота в замкнутом пространстве.

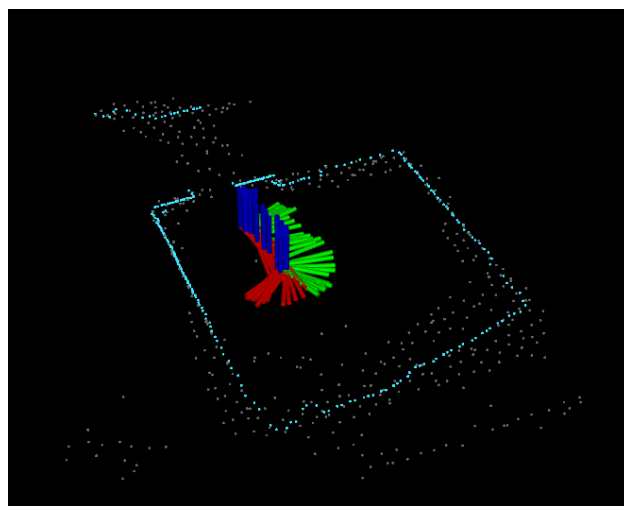


Рис. 3. Отслеживание перемещения робота по комнате при помощи лазерной одометрии
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в результате исследования.

Методы позиционирования, основанные на лазерной одометрии, довольно точны, но все же обладают некоторыми недостатками. Например, требуется дополнительная модификация этих методов в условиях динамической

среды. В качестве примера динамической составляющей может являться движение человека в помещении, в котором функционирует робот.

В таблице приведены достоинства и недостатки рассмотренных алгоритмов одометрии.

Таблица

Сравнительный анализ колесной и лазерной одометрии

Критерий оценки	Колесная одометрия	Лазерная одометрия
Точность	Имеет место накопление ошибки с течением времени	Высокая
Влияние проскальзывания	Критично	Не имеет значения
Инфраструктура пространства	Не имеет значения	Не работает в открытых пространствах без ориентиров
Динамичность среды	Не имеет значения	Требуется дополнительная обработка динамических объектов
Нагрузка на вычислители	Слабая	Высокая
Стоимость	Низкая	Высокая

Примечание: составлено авторами.

Из проведенного выше сравнительного анализа следует логичный вывод: наибольшую эффективность принесет совместная обработка информации с обоих датчиков. Этой задаче посвящен следующий раздел.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Комплексирование (sensor fusion). Вернемся к задаче локализации – нахождения координат положения робота в пространстве. Выше были рассмотрены два способа их получения: при помощи колесной и лазерной одометрии. Однако не стоит забывать, что любой датчик обладает абсолютной погрешностью измерения, никакой алгоритм локализации не застрахован от вычислительной погрешности и т. д. На практике вся входная информация с датчиков об окружающем мире включает в себя некоторый шум, а следовательно, и вычисленные значения координат положения робота в пространстве содержат в себе некоторую неточность и несут вероятностный характер [14]. Чтобы вернее понять обозначенную выше проблему, обратимся к рис. 4.

Синими метками отмечены ожидаемые положения робота, рассчитанные при помощи различных алгоритмов позиционирования. Например, для первого датчика координаты в условных единицах составляют (2, 1), для второго – (3, 2), для третьего – (1, 3). Фактическое положение робота (отмечено красной меткой) является некоторым средним между

тремя оценочными положениями и характеризуется координатами (2, 2) на плоскости. Отсюда возникает следующая задача: как можно точнее оценить реальное местоположение робота в пространстве исходя из данных, полученных с датчиков входной информации. Эта задача также называется комплексированием, или sensor fusion [15]. Для ее решения применяются различные фильтры, наиболее распространенным из них является фильтр Калмана.

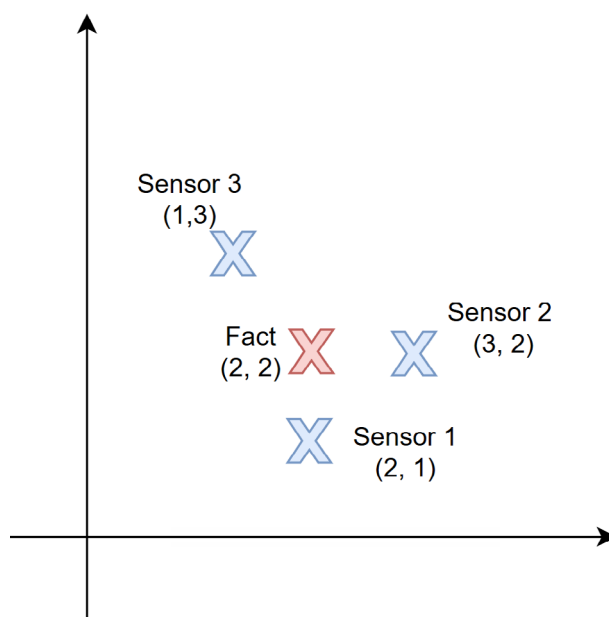


Рис. 4. Фактическое положение робота в пространстве по сравнению с рассчитанным

Примечание: составлено авторами.

Фильтрация – это выделение полезного сигнала из смеси сигнала с шумом. Основными составляющими фильтра Калмана являются вектор состояния, модель наблюдения и модель динамики. Модель наблюдения описывает, как связаны измерения с вектором состояния системы, а модель динамики описывает, как изменяется вектор состояния с течением времени. Однако классический фильтр Калмана позволяет решить задачу оптимальной линейной фильтрации, в то время как на практике мы гораздо чаще сталкиваемся с нелинейными системами. Для решения задачи оптимальной нелинейной фильтрации используется расширенный фильтр Калмана [16].

Рассмотрим визуализацию результатов работы фильтра Калмана. На рис. 5 изображены три траектории. В реальности робот описывал окружность. Слева синяя окружность представляет собой расчет траектории, полученной при помощи методов колесной одометрии. По центру красная окружность представляет собой расчет траектории, полученной при помощи лазерной одометрии. Оба набора вычислений неточны. RMSE (квадратный корень из средней квадратичной ошибки) для первой траектории составил 0,0694, для второй – 0,0298. Справа на рис. 5 изображена более точная отфильтрованная траектория, RMSE которой составил 0,0217.

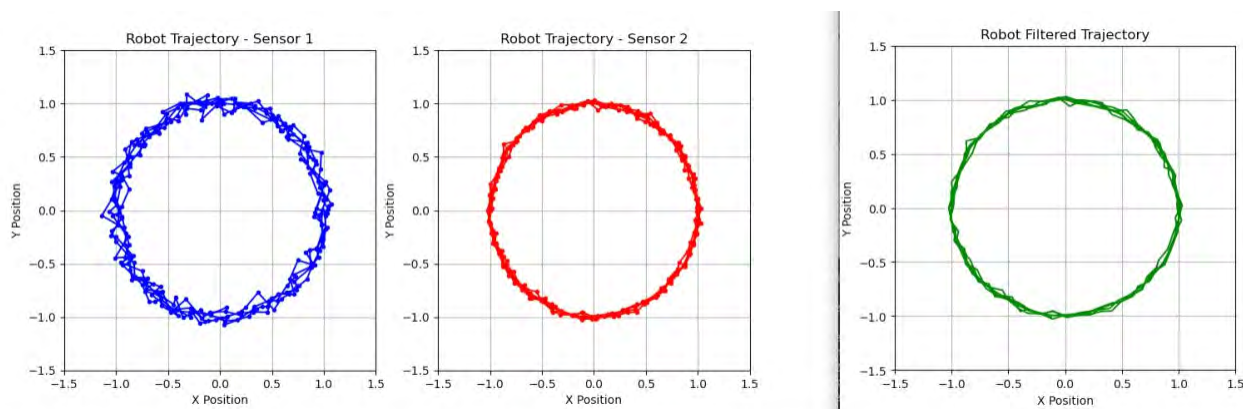


Рис. 5. Фильтрация двух траекторий при помощи фильтра Калмана

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в результате исследования.

Таким образом, комплексирование вычислений от разных сенсоров является последним этапом решения задачи позиционирования с использованием датчиков различного типа.

Задачу sensor fusion можно решать и другими методами. На данный момент активно изучаются, разрабатываются и внедряются методы нейросетевого комплексирования [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задачи позиционирования робота в пространстве может быть получено разными способами. Например, можно произвести подсчет одометрии с использованием одного лишь датчика, однако достичь высокой точности в шумной среде не удастся.

В современных робототехнических системах производится комплексирование вычислений, полученных различными алгоритмами позиционирования и одометрии. Выбор методов локализации и фильтрации во многом зависит от свойств среды. Непрерывное развитие и улучшение алгоритмов и сенсорных технологий открывает новые возможности для автоматизации и повышения эффективности использования робототехнических систем в самых разных областях: от промышленности до услуг сервиса и логистики. В дальнейшем пересечение методов, таких как компьютерное зрение, машинное обучение и сенсорные технологии, предоставляет новые горизонты в повышении точности и надежности навигации.

Список источников

1. Dzedzickis A., Subačiūtė-Žemaitienė J., Šutinys E. et al. Advanced applications of industrial robotics: New trends and possibilities // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 12, no. 1. 135 p.
2. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts: The MIT press, 2011. 453 p.
3. Borenstein J., Everett H. R., Feng L. *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*. Michigan: The University of Michigan, 1996. 282 p.
4. Drawil N. M., Amar H. M., Basir O. A. GPS localization accuracy classification: A context-based approach // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013. Vol. 14, no. 1. P. 262–273.
5. De Luca A., Oriolo G., Vendittelli M. Control of wheeled mobile robots: An experimental overview // *RAMSETE: Articulated and Mobile Robotics for Services and Technology*. 2002. P. 181–226.
6. Britting K. Unified error analysis of terrestrial inertial navigation systems // *Guidance, Control and Flight Mechanics Conference*, August 16–18, 1971. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1971. 265 p.
7. Chong K. S., Kleeman L. Accurate odometry and error modelling for a mobile robot // *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 20–25, 1997. Albuquerque: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997. Vol. 4. p. 2783–2788.
8. Borenstein J., Feng L. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1996. Vol. 12, no. 6. P. 869–880.
9. Kelly A. Linearized error propagation in odometry // *The International Journal of Robotics Research*. 2004. Vol. 23, no. 2. P. 179–218.
10. Weitkamp C. *LiDAR: Introduction*. Boca Raton: CRC Press, 2005. P. 19–54.
11. Besl P. J., McKay N. D. A method for registration of 3-D shapes // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1992. Vol. 14, no. 2. P. 239–256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>.
12. Vizzo I., Chen X., Chebrolu N. et al. Poisson surface reconstruction for LiDAR odometry and mapping // *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 30–June 05, 2021, Xi'an, China. Xi'an: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9562069>.
13. Dellenbach P., Deschaud J. E., Jacquet B. et al. CT-ICP: Real-time elastic LiDAR odometry with loop closure // *2022 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 23–27, 2022, Philadelphia, USA. Philadelphia: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICRA46639.2022.9811849>.

References

1. Dzedzickis A., Subačiūtė-Žemaitienė J., Šutinys E. et al. Advanced applications of industrial robotics: New trends and possibilities. *Applied Sciences*. 2021;12(1):135.
2. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts: The MIT press; 2011. 453 p.
3. Borenstein J., Everett H. R., Feng L. *Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning*. *University of Michigan*. 1996;119(120):27.
4. Drawil N. M., Amar H. M., Basir O. A. GPS localization accuracy classification: A context-based approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013;14(1):262–273.
5. De Luca A., Oriolo G., Vendittelli M. Control of wheeled mobile robots: An experimental overview. *RAMSETE Articulated and Mobile Robotics for Services and Technology*. 2002;181–226.
6. Britting K. Unified error analysis of terrestrial inertial navigation systems. In: *Guidance, Control and Flight Mechanics Conference*, August 16–18, 1971. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1971. 265 p.
7. Chong K. S., Kleeman L. Accurate odometry and error modelling for a mobile robot. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 20–25, 1997. Albuquerque: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1997. Vol. 4. p. 2783–2788.
8. Borenstein J., Feng L. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1996;12(6):869–880.
9. Kelly A. Linearized error propagation in odometry. *The International Journal of Robotics Research*. 2004;23(2):179–218.
10. Weitkamp C. *LiDAR: Introduction*. Boca Raton: CRC Press; 2005. P. 19–54.
11. Besl P. J., McKay N. D. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1992;14(2):239–256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>.
12. Vizzo I., Chen X., Chebrolu N. et al. Poisson surface reconstruction for LiDAR odometry and mapping. In: *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 30–June 05, 2021, Xi'an, China. Xi'an: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2021. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9562069>.
13. Dellenbach P., Deschaud J. E., Jacquet B. et al. CT-ICP: Real-time elastic LiDAR odometry with loop closure. In: *2022 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 23–27, 2022, Philadelphia, USA. Philadelphia: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2022. <https://doi.org/10.1109/ICRA46639.2022.9811849>.

14. Thrun S. Probabilistic robotics // *Communications of the ACM*. 2002. Vol. 45, no. 3. P. 52–57.
15. Yeong D. J., Velasco-Hernandez G., Barry J. et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review // *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 6. P. 2140.
16. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82. P. 35–45.
17. Chitta K., Prakash A., Jaeger B. et al. TransFuser: Imitation with transformer-based sensor fusion for autonomous driving // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2022. Vol. 45, no. 11. P. 12878–12895.
14. Thrun S. Probabilistic robotics. *Communications of the ACM*. 2002;45(3):52–57.
15. Yeong D. J., Velasco-Hernandez G., Barry J. et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review. *Sensors*. 2021;21:2140.
16. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*. 1960;82:35–45.
17. Chitta K., Prakash A., Jaeger B. et al. TransFuser: Imitation with transformer-based sensor fusion for autonomous driving. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2022;45(11):12878–12895.

Информация об авторах

А. А. Гордова – магистрант;
<https://orcid.org/0009-0005-6482-3668>,
a.gordova@inbox.ru✉

А. С. Прутский – заведующий лабораторией робототехники и мехатроники;
<https://orcid.org/0000-0001-8476-2915>,
prutskiyalex@gmail.com

About the authors

A. A. Gordova – Master’s Degree Student;
<https://orcid.org/0009-0005-6482-3668>,
a.gordova@inbox.ru✉

A. S. Prutskii – Lecturer, Head of Robotics and Mechatronics Laboratory;
<https://orcid.org/0000-0001-8476-2915>,
prutskiyalex@gmail.com

Научная статья

УДК 621.373.14

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-3>**Высоковольтный генератор барьерных разрядов:
моделирование и экспериментальная проверка****Олег Валерьевич Гусев***Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва,
Рыбинск, Россия*

Аннотация. Описана модель силовой части устройства, используемого для генерации плазменного барьерного разряда при атмосферном давлении в газоразрядном промежутке. Модель состоит из силовой части, высоковольтного трансформатора, а также системы управления. Модель реализована с использованием средств физического моделирования. В статье приведены результаты как моделирования, так и проведенного эксперимента по получению плазменных барьерных разрядов.

Ключевые слова: барьерный разряд, холодная плазма, высокочастотный трансформатор, Simscape-модель, физическое моделирование, мостовая топология

Для цитирования: Гусев О. В. Высоковольтный генератор барьерных разрядов: моделирование и экспериментальная проверка // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 21–34. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-3>.

Original article

A high-voltage barrier discharge generator: Modeling and experimental verification**Oleg V. Gusev***Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia*

Abstract. The paper describes a power unit model of a device generating a plasma barrier discharge at atmospheric pressure in a gas-discharge gap. This model includes a power unit, a high-voltage transformer, and a control system, which are all produced using physical simulation tools. The research presents both the modeling results and the experiment findings of obtaining dielectric barrier discharges.

Keywords: barrier discharge, cold plasma, high-frequency transformer, Simscape, physical simulation, full-bridge topology

For citation: Gusev O. V. A high-voltage barrier discharge generator: Modeling and experimental verification. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):21–34. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-3>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе представлена модель силового инвертора, служащего для формирования импульсов с крутым фронтом и способного возбуждать барьерный разряд в газах разного состава (а также непосредственно в воздухе) при атмосферном давлении. Барьерный разряд является популярным источником для получения холодной плазмы [1, 2]. Холодная, или неравновесная, плазма пред-

ставляет собой слабоионизированный газ, в котором температура электронов выше температуры тяжелых ее компонентов (ионов, нейтральных частиц). При этом температура такой плазмы нередко близка к комнатной и не превышает нескольких сотен градусов Цельсия [3]. Степень ионизации холодной плазмы оценивают соотношением:

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_n} \ll 1,$$

где n_i – плотность заряженных частиц, $n_i + n_n$ – плотность заряженных и нейтральных частиц (в частицах на кубический метр).

Холодная плазма используется в области биомедицины для стерилизации ран и заживления тканей [4], в промышленности для обработки полимерных материалов [5, 6], в микроэлектронике для травления и осаждения пленок. К преимуществам холодной плазмы можно отнести, например, возможность ее генерации при атмосферном давлении, что позволяет избавиться от использования вакуумной техники. Низкая температура генерируемой плазмы не повреждает термочувствительные материалы при их обработке.

Для получения плазмы барьерного разряда используются плоскопараллельные конфигурации, показанные на рис. 1. При плоской геометрии электродов барьерный разряд осуществляют в газовом зазоре воздушного зазора. В зависимости от применения ширина разрядного зазора варьируется от долей миллиметра (<0,1 мм) в ячейках плазменных

панелей до нескольких миллиметров в установках производства озона [7]. В качестве диэлектрика используют стекло, кварцевое стекло, слюду, керамику или тонкие слои полимерных материалов. Наличие диэлектрического барьера означает, что для работы такого разряда необходимо переменное напряжение, так как диэлектрик не может проводить постоянный ток. В этом случае ток проводимости в межэлектродном промежутке (разрядный узел) обеспечивается током смещения через диэлектрический барьер.

Конструкция и геометрия узла, где формируется разряд, выбирают в зависимости от решаемой задачи. Конфигурация с «плавающим» диэлектриком (см. рис. 1а), когда между двумя электродами помещается диэлектрический материал, применяется в задачах обработки полимеров, тканей и нетканых материалов. Плоскопараллельные конфигурации (см. рис. 1б, в) с диэлектриком, расположенным на одном или обоих электродах, широко используются в физических экспериментах и задачах обработки поверхностей [7].

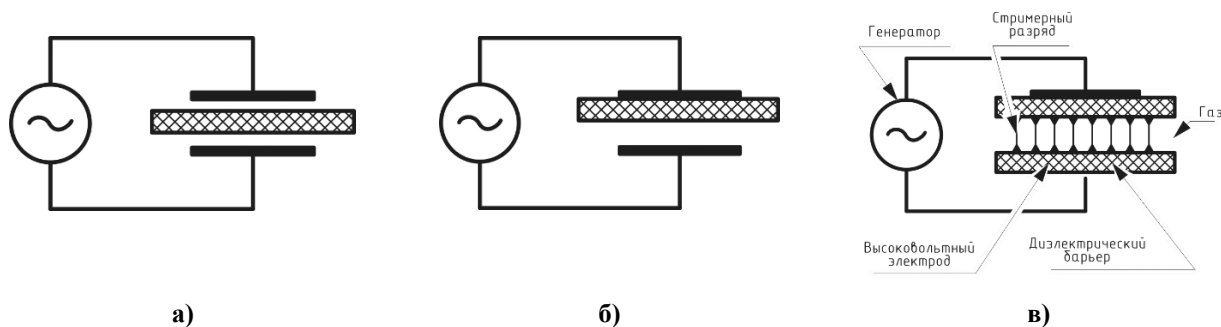


Рис. 1. Плоскопараллельная конфигурация барьерного разряда при разном размещении пластины диэлектрического материала:

- а) конфигурация с «плавающим» диэлектриком;
- б) плоскопараллельная конфигурация с одним барьером;
- в) симметричная плоскопараллельная конфигурация с двумя барьерами

Примечание: составлено автором на основании источника [7].

Диэлектрическая проницаемость и толщина барьера вместе со скоростью изменения приложенного напряжения (dU/dt) определяют величину тока смещения, проходящего через диэлектрический барьер. Напряженность электрического поля в разрядном промежутке должна быть достаточной для пробоя газа. В связи с тем что на высоких частотах

токоограничивающий эффект диэлектрика снижается для создания неравновесной плазмы, к электродам прикладывают синусоидальное или импульсное напряжение с частотой от 50 Гц до 10 МГц [7, 8]. Амплитуда импульсов не превышает 10 кВ. Исследование [9] показывает, что барьерные разряды в воздухе при атмосферном давлении горят в плоскости

электродов в виде множества плазменных разрядов (филаментов), которые плотно распределяются по газоразрядному промежутку. При этом отдельные разряды фиксируются на осциллограмме напряжения в виде резких всплесков, каждый из которых соответствует пробоем воздушного промежутка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходя из вышесказанного, модель устройства для генерации плазмы барьерного разряда должна включать в себя блок формирования сигналов управления, силовой модуль, а также блок, который будет отвечать за увеличение амплитуды импульсов, поступающих

на разрядное устройство. В связи с тем что частота переменного электрического поля варьируется в широких пределах, в качестве генератора управляющих импульсов с крутым фронтом целесообразно использовать микропроцессор. Сигналы управления с микропроцессора поступают на блок силового модуля и далее на высокочастотный трансформатор, который осуществляет усиление импульсов по амплитуде. Так как в устройстве есть слаботочная часть управления и силовой модуль, то между ними необходимо предусмотреть гальваническую развязку. Блок-схема системы генерации барьерных разрядов приведена на рис. 2.

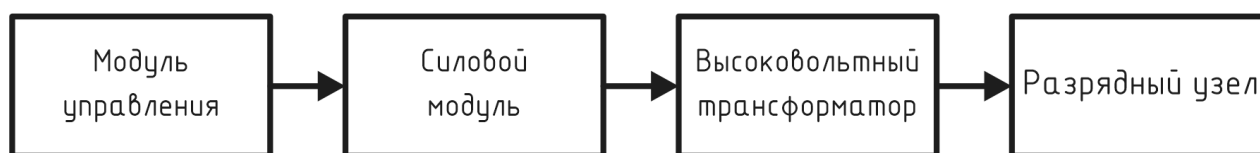


Рис. 2. Структурная схема модели генерации барьерных разрядов

Примечание: составлено автором.

Силовой модуль состоит из ключевых элементов, которые соединены по определенной схеме. При выборе топологии силового модуля рассматривались резонансные схемы мостовых и полумостовых LLC-преобразователей (Full-Bridge, Half-Bridge), а также схемы импульсных преобразователей с повышающим трансформатором. Резонансные схемы хорошо подходят для генерирования высоких напряжений на резонансной частоте. Настройка на резонанс осуществляется путем изменения частоты и скважности управляющих импульсов. К недостаткам резонансных преобразователей можно отнести их чувствительность к изменению параметров нагрузки, так как при нестабильности барьерного разряда эффективность резонансного режима снижается [10, 11].

Альтернативой резонансных преобразователей являются импульсные схемы с полумостовой и мостовой топологией силовых ключей (Half-Bridge и Full-Bridge соответственно). В сочетании с высокочастотными трансформаторами данные схемы широко применяются в системах генерации барьерного разряда, особенно в промышленных озонаторах, плазменных установках и коронных разрядниках [12].

В результате анализа литературы и данных источника [13] предпочтение было отдано мостовой топологии (Full-Bridge) импульсного преобразователя.

В качестве ключевых элементов схемы в импульсных преобразователях используются гибридные Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) – транзисторы и полевые транзисторы с изолированным затвором (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) [13]. MOSFET-транзисторы, по сравнению с IGBT, больше подходят в качестве ключевых элементов для силового модуля, так как могут работать на более высоких частотах преобразования. К недостаткам MOSFET можно отнести более низкое значение коммутируемого напряжения (V_{DS}) по сравнению с IGBT (для MOSFET-транзисторов типовое значение $V_{DS} = 600$ В, для IGBT $V_{DS} > 1\ 200$ В [14]). Однако данный недостаток не является существенным, так как предполагается, что питание силового модуля будет осуществляться от однофазной сети переменного тока, поэтому коммутируемое напряжение не будет превышать $= 340$ В.

На рис. 3 показаны принципиальные схемы одного плеча полумоста и полумостовая схема (Half-Bridge) силового модуля соответственно. Моделирование и расчет элементов силового модуля выполнен в соответствии с рекомендациями, данными в [15]. Цепь состоит из силового MOSFET-ключа (элемент VT на рис. 3а), пассивной снабберной RC-цепи, резистора в цепи затвора R_g и обратного диода (элемент VD на рис. 3а). Резистор R_{gs} подключается между затвором и истоком MOSFET-транзистора и необходим для разряда затвора в случае обрыва соединения со схемой управления (драйвером). Последнее может привести к короткому замыканию в схеме, так как MOSFET-транзистор может оказаться в открытом состоянии). Типичное значение резистора, рекомендуемое производителями [15], $R_{gs} = 10\text{--}15$ кОм. В силовых схемах RC-снаббер защищает MOSFET-транзисторы от перенапряжений, возникающих из-за индуктивности монтажа и проводников питания. Резистор R_g служит для ограничения тока затвора MOSFET-транзистора и регулирует время переключения. Типичные значения данного резистора лежат в диапазоне $R_g = 4,7\text{--}100$ Ом и в общем случае корректируются во время эксперимента. Малые значения R_g ведут к ускорению переключения транзистора, и тем самым уменьшаются потери, однако возникает риск увеличения выбросов напряжения; увеличение величины R_g приво-

дит к демпфированию выбросов напряжения, но увеличивает время переключения ключа, что приводит к росту динамических потерь. Оптимальные значения R_g можно определить исходя из выражения [16]:

$$R_g = \frac{V_{DR} - V_{TH}}{I_{GPEAK}}, \quad (1)$$

где V_{DR} – напряжение питания схемы управления (драйвера) [В], V_{TH} – пороговое напряжение открытия MOSFET-транзистора [В], I_{GPEAK} – пиковый ток затвора [А].

Пиковый ток затвора I_{GPEAK} может быть вычислен исходя из справочных данных к конкретному MOSFET-транзистору и определялся исходя из выражения [16]:

$$I_{GPEAK} = \frac{Q_G}{t_r}, \quad (2)$$

где Q_G – полный заряд затвора MOSFET-транзистора [Кл], t_r – необходимое время включения MOSFET-транзистора [с].

В ряде случаев для защиты затвора полевого MOSFET-транзистора параллельно резистору R_{gs} устанавливают быстродействующий стабилитрон или двунаправленный TVS-диод. Их основная функция – поглощение всплесков напряжения, возникающих при быстрой коммутации транзистора в индуктивных цепях, а также ограничение напряжения, подаваемого на затвор от схемы управления.

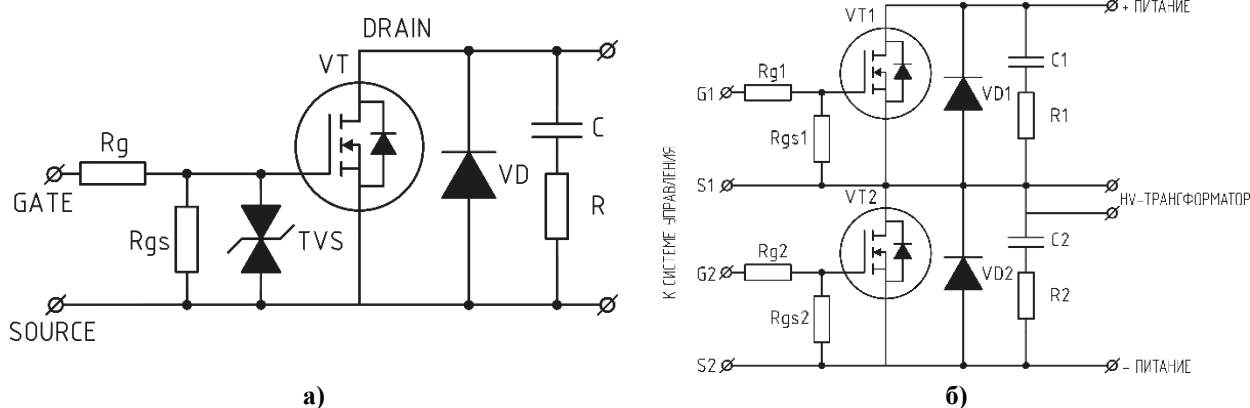


Рис. 3. Схема силового модуля системы генерации барьерного разряда:
 а) схема одного плеча полумоста с RC-снаббером;
 б) полумостовая (Half-Bridge) схема системы генерации барьерного разряда

Примечание: составлено автором.

Снабберная цепь. Когда силовой прибор резко выключается, энергия, запасенная в паразитной индуктивности цепи питания, рассеивается на ключевом элементе, вызывая выброс напряжения. Амплитуда этого напряжения пропорциональна величине паразитной индуктивности и скорости спада тока. Для устранения данных выбросов используются пассивные RC-цепи (снабберы). Снабберные цепи обеспечивают оптимальную защиту от переходных напряжений при нормальных процессах включения и выключения MOSFET-транзистора. Их применение позволяет повысить быстродействие системы, сохраняя рабочие параметры в пределах допустимой области безопасной работы. Для вычисления значений параметров RC-цепи (величины снабберного сопротивления R и емкости C) отталкиваются от того, что постоянная времени снаббера T_s должна быть как минимум в 3–4 раза ниже периода рабочей частоты:

$$T_{sw} > (3-4) \cdot RC,$$

где R – сопротивление снаббера [Ом], C – емкость снаббера [Ф].

Схема управления. Схема управления MOSFET-транзисторами (драйвер) преобразует логические импульсы, поступающие от микропроцессора, в управляющие. Микросхема драйвера обеспечивает достаточный ток для гарантированного открытия и закрытия MOSFET-транзистора. Величина положительных импульсов управления, подаваемых на затворы MOSFET-транзисторов, лежит в пределах 12–18 В [14]. В связи с тем что в мостовой схеме поочередно работают (включены) два транзистора, импульсы управления должны подаваться по двум отдельным управляющим каналам, сдвинутые по времени относительно друг друга (рис. 4а), с наличием пауз (dead-time) для устранения сквозных токов. Время dead-time (t_{DT}) не должно превышать времени включения (t_{rise}), выключения (t_{fall}) и времени задержки работы самой драйверной микросхемы (t_{prop}):

$$t_{DT} \geq t_{prop} + \frac{t_{fall} - t_{rise}}{2}.$$

Типичные значения величины t_{DT} зависят от микросхемы и лежат в диапазоне 50–500 нс (например, для драйверов Infineon, IR2104, IR2110).

При выборе среды моделирования силовой схемы инвертора основной акцент был на достоверности получаемых результатов. Последнее достигается применением физических принципов моделирования, то есть когда модели строятся на базе физических компонентов (полупроводники, пассивные элементы, двигатели). Все элементы соединяются между собой так же, как и в реальной схеме, то есть применяется топологическое моделирование. Перечисленным требованиям отвечает среда Simscape Electrical, являющаяся расширением Simulink/Simscape [17]. Моделирование силовых полупроводниковых элементов, а также иных пассивных компонентов схемы в среде Simscape Electrical осуществляется путем соединения соответствующих блоков модели между собой, то есть отвечает принципам топологического моделирования. Возможность задания нелинейных вольт-амперных характеристик элементов модели, которые соответствуют реальным компонентам схемы, позволяет максимально точно проанализировать поведение модели и сравнить ее с реальной схемой. На рис. 4б показана модель драйвера управления полумостовой схемой с реализацией времени задержки (dead-time) в среде Simscape Electrical. Блок модели Controlled PWM Voltage (см. рис. 4б) генерирует PWM-сигнал с заданной скважностью и частотой. Величина времени задержки t_{DT} задается через параметры драйвера (блок Half-Bridge Driver, рис. 4б).

Опторазвязка схемы управления (микроконтроллера) и силовой части системы генерации барьерного разряда осуществляется с применением быстродействующей оптопары. Модель оптопары в системе SIMULINK состоит из светодиода на стороне схемы управления и фототранзистора, который выдает импульсы управления на силовой модуль (см. рис. 5).

Прямоугольный PWM-сигнал на оптопару (блок Optocouper на рис. 5) поступает от источника напряжения с широтно-импульсной модуляцией (блок Controlled PWM Voltage

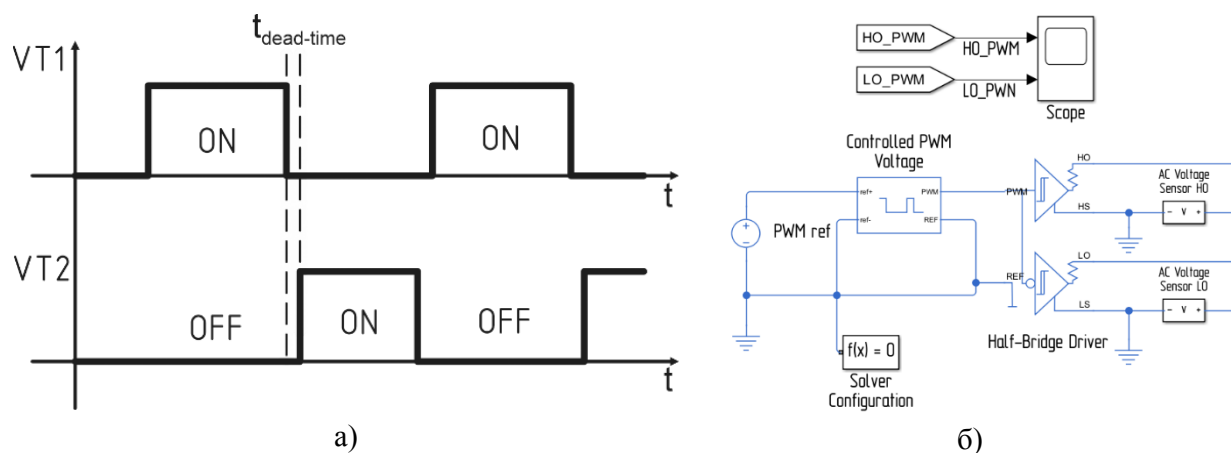


Рис. 4. Модель системы управления и результаты моделирования:
 а) диаграммы управляющих импульсов с наличием временем задержки (dead-time);
 б) Simscape-модель системы управления полумостового драйвера с реализацией dead-time
 Примечание: составлено автором.

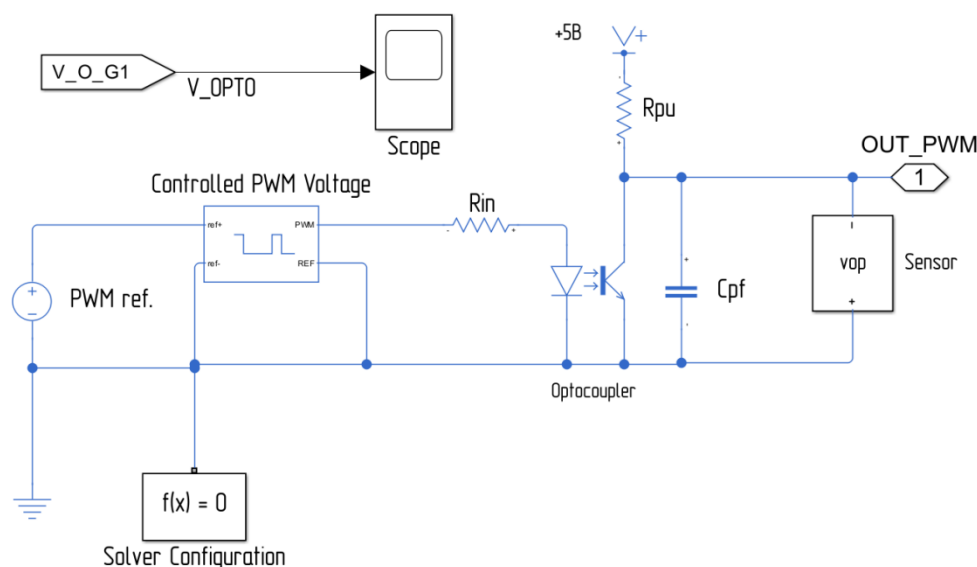


Рис. 5. Simscape-модель системы управления с блоком гальванической развязки на основе оптопары
 Примечание: составлено автором.

на рис. 5а). Данный блок генерирует импульсы с фиксированной амплитудой напряжения, заданной скважностью и частотой. Входной ограничивающий резистор (блок Rin на рис. 5) ограничивает ток светодиода. Его значение определяется исходя из выражения:

$$R_{IN} \geq \frac{V_{CC} - V_{FD}}{I_{FO}},$$

где V_{CC} – напряжение питания микросхемы [В], V_{FD} – падение напряжения на светодиоде [В], I_{FO} – ток светодиода [А].

Величина сопротивления блока Rin для моделирования задавалась равной 470 Ом как

наиболее близкой к реальной ситуации. Подтягивающий резистор (блок Rpu на рис. 5) используется для моделирования устройств с открытым стоком. Его типичные значения варьируются от 1 до 10 кОм (в модели величина этого сопротивления задавалась равной 10 кОм). В качестве PWM-сигнала использовался меандр с частотой 10 кГц и амплитудой 5 В. Модель оптрона в системе SIMULINK, как было сказано выше, в своем составе содержит диод, который имеет внутреннюю паразитную емкость pn-перехода (junction capacitance). Паразитная емкость pn-перехода приводит к возникновению импульсов напряжения. Для

их устранения в модели используется блок фильтра на основе конденсатора (блок Crf на рис. 5, значение для модели задавалось равное 47 pF и оценивалось на основе проведенных исследований).

Силовая схема. Блочная Simscape-модель силовой части системы (рис. 6) совпадает по компонентам с принципиальной схемой силового модуля системы генерации барьерного разряда (см. рис. 3).

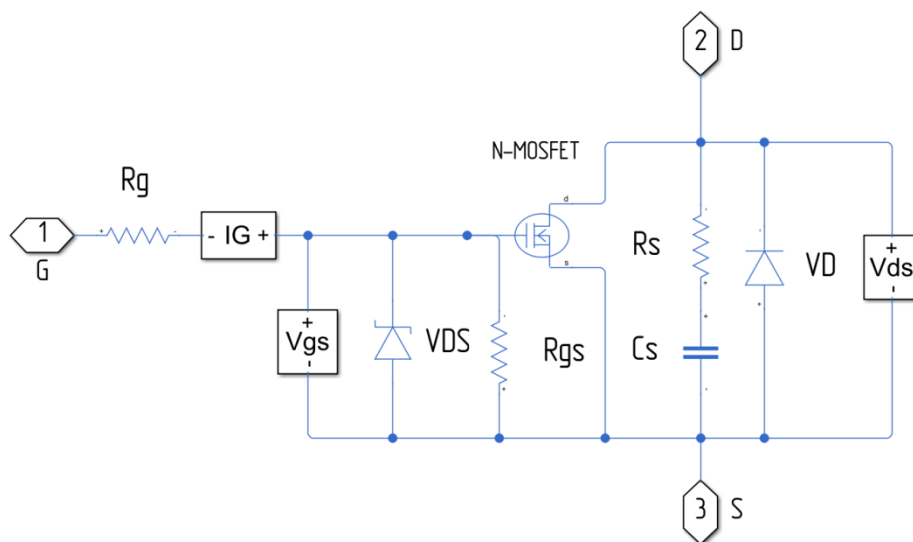


Рис. 6. Блочная Simscape-модель силового модуля системы генерации барьерного разряда

Примечание: составлено автором.

В модели используется стабилитрон (блок VDS на рис. 6) в цепи затвора MOSFET. Как было сказано выше, его основное назначение – шунтирование выбросов и поглощение импульсных помех, то есть выполнение защитных функций. Резистор в цепи затвора (блок R_g на рис. 6) ограничивает скорость коммутации и уменьшает ЕМI-помехи. Его значение в модели рассчитывалось исходя из выражения (1) и задавалось равным 10 Ом. Резистор R_{gs} выполняет защитные функции, его значение устанавливалось равным 10 кОм. Выводы блочной модели Gate, Drain и Source обозначают три основных электрода MOSFET-транзистора, которые соединяются с внешними цепями. Для измерения величины импульсов тока в цепи затвора MOSFET-транзистора в модели используется датчик тока (блок IG на рис. 6), для измерения уровня напряжения между выводами транзистора используются датчики напряжения (блоки Vgs и Vds на рис. 6). При физическом моделировании MOSFET-транзистора в системе MATLAB используется его уточненная SPICE-модель. Параметры разделены на статические (определяют вольтамперную

характеристику транзистора), динамические (определяют скорость коммутации транзистора) и параметры, которые описывают сопротивление истока и стока транзистора [17].

Силовой трансформатор. Модель силового трансформатора описывается подсистемой, состоящей из блоков, показанных на рис. 7. Гистерезисные свойства сердечника трансформатора описываются Simscape-блоком Nonlinear reluctance. В параметрах блока задаются геометрические параметры сердечника трансформатора (эффективная длина – L_e и эффективная площадь – A_e сердечника), а также начальная кривая намагничивания (зависимость $B(H)$). Для учета магнитного сопротивления системы и учета потерь на вихревые токи использовался блок Eddy Loss. Так как при работе любого трансформатора возникают потоки рассеяния, которые создаются токами первичной и вторичной обмоток, то для их учета в модели применялись два блока (блоки Primary leakage и Secondary leakage соответственно). Учет активных сопротивлений первичной и вторичной обмотки трансформатора реализуется через блоки Rpw и Rsw.

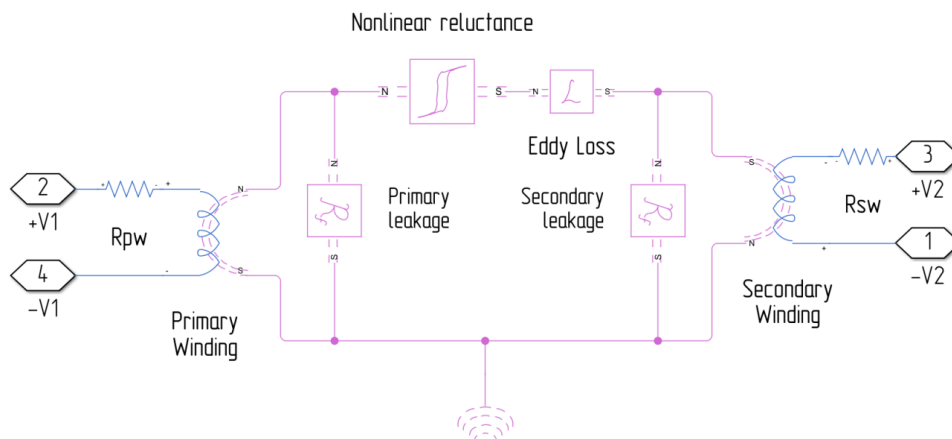


Рис.7. Блочная Simscapre-модель силового трансформатора

Примечание: составлено автором.

На рис. 8 представлена комплексная Simscapre-модель, которая включает в себя все вышеописанные блоки. Для лучшего восприятия в модели выделены пять основных областей. Каждая из выделенных областей включает в себя блоки подсистем (SubSystem). Области с наименованием «Драйверы верхнего плеча» и «Драйверы нижнего плеча» содержат четыре подсистемы, которые моделируют драйверы с опторазвязкой (см. рис. 4 и 5). Каждая из подсистем отвечает за генерацию управляющих импульсов с крутым фронтом, подаваемых на силовые элементы схемы. В области с названием «Мостовая схема» расположены четыре подси-

стемы с пиктограммой MOSFET-транзисторов, соединенных по мостовой схеме. Каждая из подсистем содержит блочную модель одного плеча силового модуля (см. рис. 6). Область «Блок силового трансформатора» содержит подсистему модели трансформатора (рис. 7), а также датчики тока и напряжения, которые фиксируют токи и напряжения на первичной и вторичной его стороне. В области «Результаты моделирования» отображаются временные диаграммы, на которых показаны напряжения и токи, протекающие по первичной и вторичной обмоткам силового трансформатора, а также токи и напряжения на силовых элементах схемы.

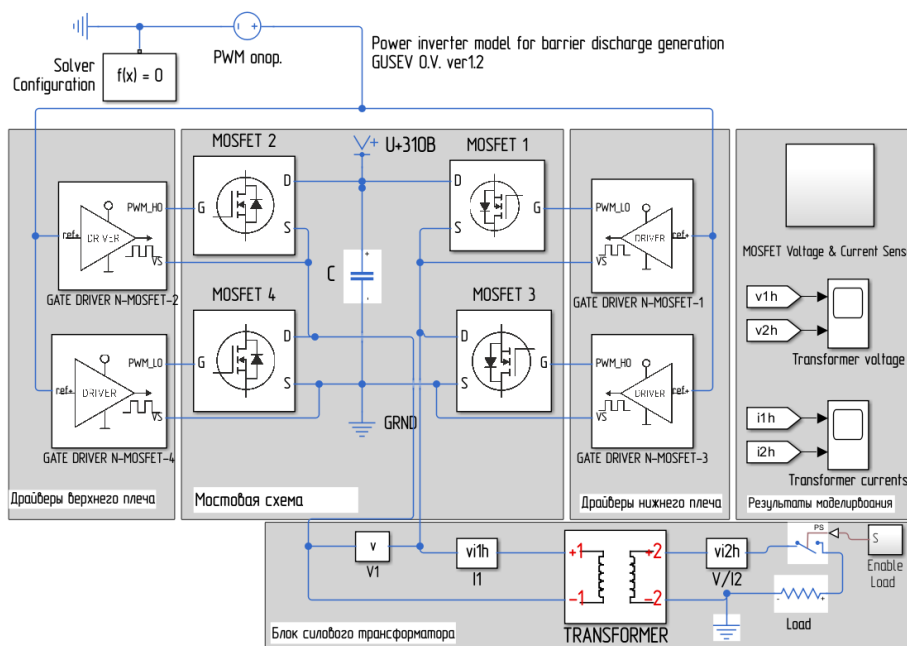


Рис. 8. Блочная Simscapre-модель силового инвертора для генерации барьерного разряда

Примечание: составлено автором.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки результатов моделирования был изготовлен прототип силового инвертора, который имеет выраженную блочную структуру, показанную на рис. 2. Для создания запаса по коммутируемому току в качестве силовых ключей в прототипе использовались полевые MOSFET-транзисторы FQPF20N60 с максимальным током 20 А и коммутируемым напряжением до 600 В.

В качестве драйвера верхнего и нижнего плеча применялась распространенная микросхема IR2104. Для формирования управляющих импульсов (меандр) с крутым фронтом и заданной частотой следования использовалась плата Arduino NANO V3.0. Параметры MOSFET-транзисторов FQPF20N60, которые необходимы для моделирования силового инвертора в системе MATLAB, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры, описывающие SPICE-модель транзистора в системе MATLAB

Наименование	Обозначение параметра в SPICE-модели	Значение для FQPF20N60
1. Статические параметры		
Сопrotивление сток-исток в открытом состоянии, Ом	$R_{ds(on)}$	0,19
Ток стока, А	I_{ds}	11
Максимальное напряжение затвор-исток, В	V_{gs}	30
Пороговое напряжение затвора транзистора, В	V_{th}	2,5
Коэффициент модуляции длины канала	L	0,01
2. Внутренние сопротивления		
Сопrotивление стока, Ом	R_s	0,01
Сопrotивление истока, Ом	R_d	0,01
3. Динамические (емкостные) параметры		
Входная емкость, пФ	C_{iss}	2 322
Проходная емкость, пФ	C_{rss}	4
Выходная емкость, пФ	C_{oss}	105

Примечание: составлено автором по источнику [18].

В качестве высоковольтного трансформатора использовался трансформатор на основе магнитопровода марки UY20. Магнитопровод UY20 представляет собой П-образный сердечник с круглым сечением кернов из феррита марки Н44 [19]. Вторичная обмотка трансформатора содержит 3 200 витков (разбитых

на секции) провода диаметра 0,2 мм. Габаритные размеры магнитопровода даны на рис. 9а, общий вид трансформатора с высоковольтной обмоткой показан на рис. 9б. Характеристики материала представлены в табл. 2, магнитные свойства материала сердечника Н44, кривая $B(H)$, показаны на рис. 9в.

Таблица 2

Характеристики материала Н44

Наименование	Параметр	Значение	
Начальная магнитная проницаемость	μ_i	2 400 ± 25 %	
Сопrotивление, Ом*м	P	3	
Индукция насыщения, мТл	B_s	25	510
		100	390
Коэрцитивная сила, А/м	H_c	13	
Потери мощности, мВт/см ³ (25 кГц, В = 200 мТл)	P_c	25 °С	130
		60 °С	90
		80 °С	
		100 °С	100
Температура Кюри, °С	T_c	>230	
Плотность, г/см ³	d	4,8	

Примечание: составлено автором по источнику [19].

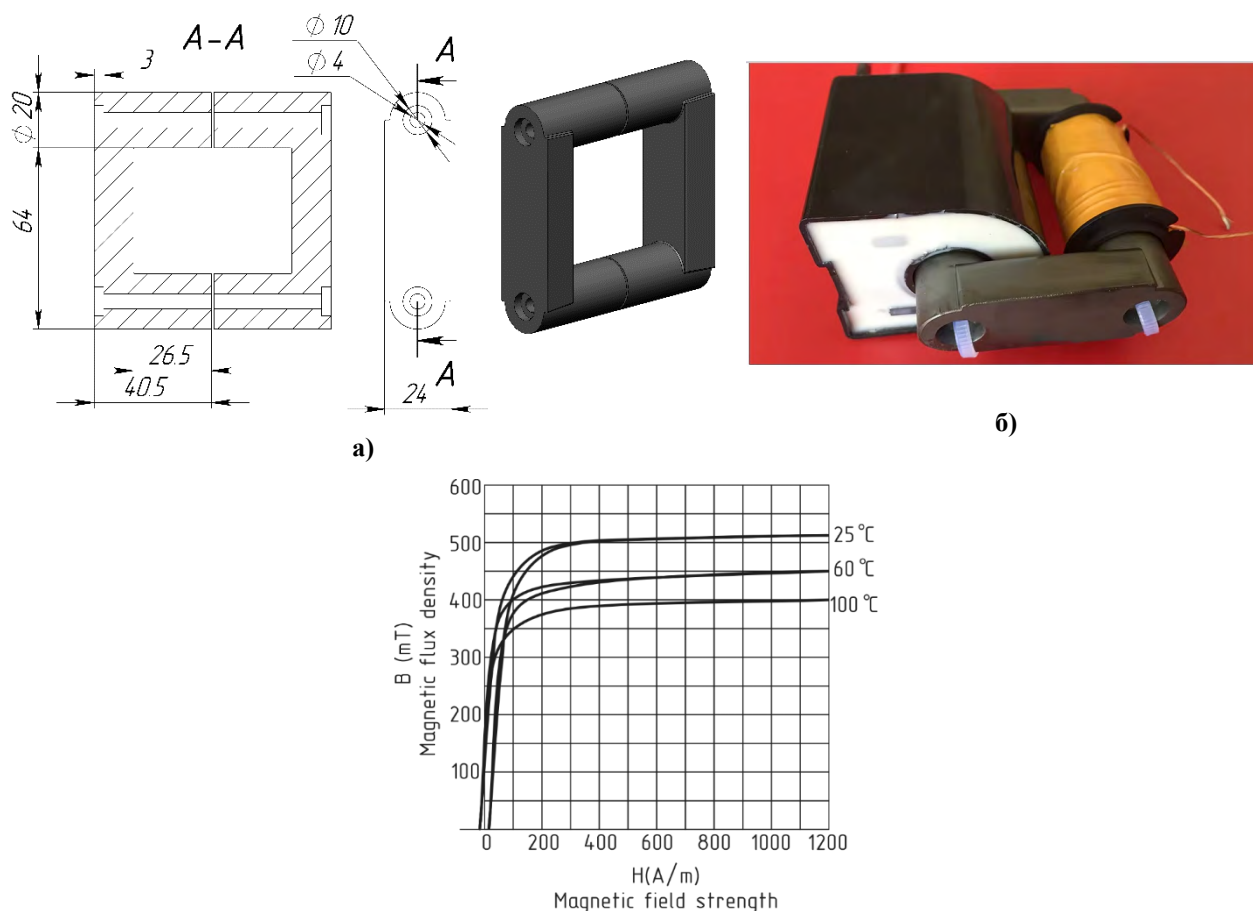


Рис. 9. Высоковольтный трансформатор:
 а) габаритные размеры магнитопровода UY20;
 б) общий вид силового трансформатор с высоковольтной обмоткой;
 в) основная кривая намагничивания $B(H)$ материала Н44 сердечника UY20

Примечание: получено автором.

Геометрические параметры магнитопровода UY20 (параметры L_e и A_e), необходимые для моделирования, даны в табл. 3.

Разрядный узел выполнен в виде плоско-параллельной конструкции электродов (см. рис. 10а). В качестве диэлектрика между электродами использовалась пластина из калиевой слюды (мусковита) квадратной формы размером 25×25 мм и толщиной 0,5 мм. Электроды, изготовленные из меди, имели

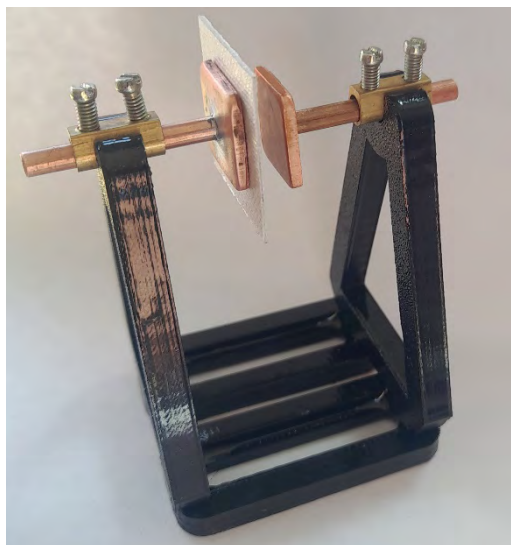
квадратную форму размером 10×10 мм и толщину 2 мм. Фото прототипа платы силового инвертора с основными узлами показано на рис. 10б. На рис. 10в показаны барьерные разряды, полученные в результате проведения эксперимента с использованием прототипа силового инвертора и разрядного узла с силовым трансформатором. Измеряемые параметры при проведении эксперимента занесены в табл. 4.

Таблица 3

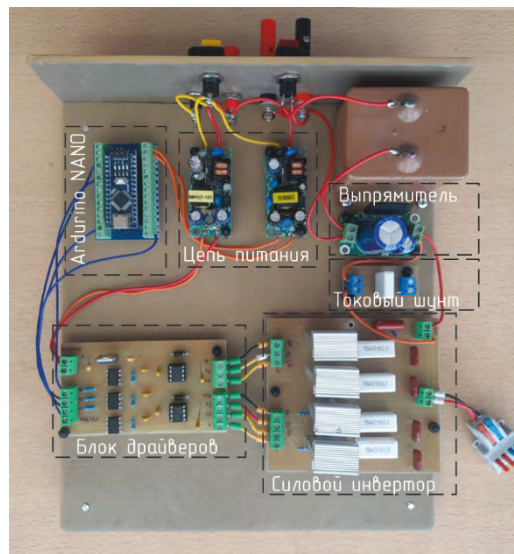
Параметры магнитопровода UY20

Наименование	Параметр	Значение
Эффективная длина магнитного пути, мм	L_e	210
Эффективная площадь поперечного сечения, мм ²	A_e	290
Объем сердечника, мм ³	V_e	61 000
Постоянная сердечника, мм-1	Cl	0,724
Коэффициент индуктивности, нГн/вит ²	Al	3 750

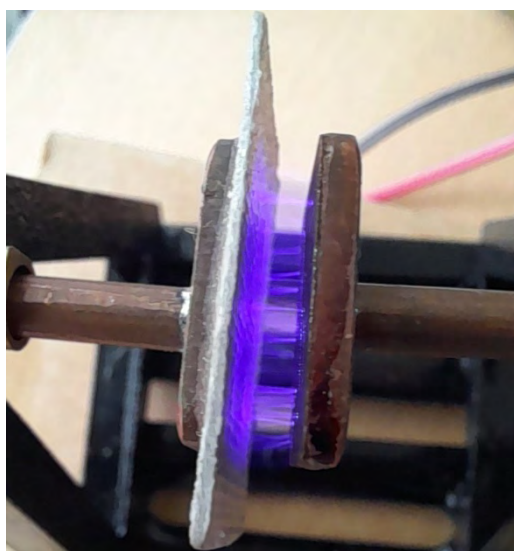
Примечание: составлено автором по источнику [19].



а)



б)



в)

Рис. 10. Макет платы силового инвертора:
 а) разрядный узел с диэлектрической вставкой из мусковита;
 б) плата силового инвертора;
 в) барьерные разряды, сгенерированные в разрядном узле

Примечание: составлено автором.

Таблица 4

Параметры эксперимента генерации барьерных разрядов

Наименование измеряемого параметра	Значение
Величина воздушного зазора между электродами, мм	6
Напряжение питания силового инвертора (напряжение пробоя), В	190
Частота следования силовых импульсов (меандр), кГц	8
Количество витков первичной обмотки, вит.	200
Величина тока до момента пробоя, мА	74
Величина тока после пробоя, мА	152

Примечание: составлено автором.

Из табл. 4 видно, что ток, при котором происходит пробой искрового промежутка, и ток, предшествующий этому состоянию, различаются практически в два раза. Увеличение тока связано с тем, что отдельные филаменты создают тонкие ионизированные каналы с высокой проводимостью (каналы плазмы), которые достаточно резко уменьшают общее

сопротивление промежутка. На рис. 11 показаны результаты измерения при проведении эксперимента и результаты моделирования платы силового инвертора. Качественное соответствие результатов моделирования и измерения позволит в дальнейшем произвести калибровку модели под конкретные экспериментальные измерения.

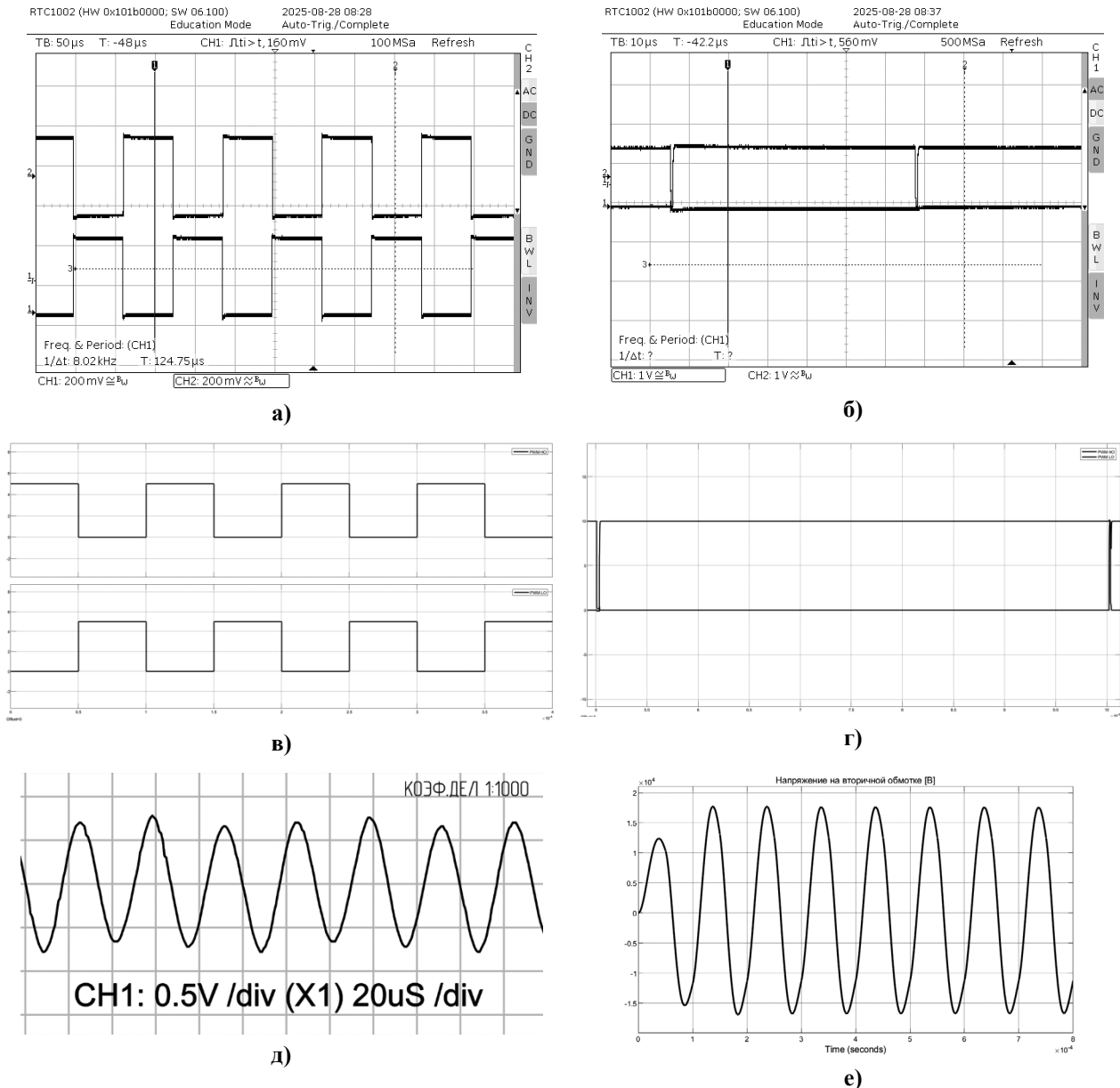


Рис. 11. Результаты измерения и моделирования:

- а) управляющие импульсы микроконтроллера (верхний и нижний каналы);
- б) импульсы с платы драйверов (верхний и нижний каналы);
- в) результаты моделирования управляющих импульсов;
- г) результаты моделирования импульсов платы драйвера;
- д) форма напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора (коэффициент деления 1:1000);
- е) результаты моделирования напряжения на вторичной обмотке трансформатора

Примечание: составлено автором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена модель системы, состоящей из силового инвертора и высоко-частотного трансформатора, для устройства получения барьерных разрядов. Проверка результатов моделирования проводилась на разработанном прототипе силового инвертора с разрядным узлом и силовым трансформатором, описанными в статье. Полученные экспериментальные результаты подтвердили эффективность использования модели и могут

служить основой для дальнейших исследований. Последние могут включать варьирование частоты напряжения первичной обмотки силового трансформатора, изменение форм электродов в разрядном узле. Перспективные направления дальнейших исследований включают: изучение динамических режимов работы системы, разработку адаптивных алгоритмов управления, исследование влияния материалов электродов на стабильность разряда.

Список источников

1. Penetrante B. M., Schultheis S. E. *Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control. Parts A and B.* Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1993.
2. Fridman A., Kennedy L. A. *Plasma Physics and Engineering.* Boca Raton : CRC Press, 2004. 853 p.
3. *Plasma Technology for Hyperfunctional Surfaces: Food, Biomedical, and Textile Applications* / Rauscher H., Perucca M., Buyle G., eds. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. 428 p.
4. Weltmann K. D., Kindel E., Brandenburg R. et al. Atmospheric Pressure Plasma Jet for Medical Therapy: Plasma Parameters and Risk Estimation // *Contribution to Plasma Physics*, 2009. Vol. 49, no. 9. P. 631–640.
5. Рыбкин В. В., Титов В. А. Кинетика и механизмы взаимодействия окислительной плазмы с полимерами // *Энциклопедия низкотемпературной плазмы.* М. : Янус-К, 2005. Т. 8. С. 130–170.
6. Wolf R., Sparavigna A. C. Role of plasma surface treatments on wetting and adhesion // *Engineering.* 2010. Vol. 2, no. 6. P. 397–402.
7. Masuhiro K., Okazaki S. Raising of ozone formation efficiency in a homogeneous glow discharge plasma at atmospheric pressure // *Journal of Physics D.* 1994. Vol. 27, no. 9, P. 1985–1987. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/27/9/026>.
8. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications // *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 2003. Vol. 23, no. 1. P. 1–46.
9. Peeters F. J. J., The electrical dynamics of dielectric barrier discharges. Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2015. 197 p.
10. Erickson R. W., Maksimovic D. *Fundamentals of Power Electronics.* 2nd ed. Springer, 2001. 883 p.
11. Yang B. *Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System.* Doctoral Thesis. Virginia Tech, 2003. 317 p.
12. Liu C., Gu B., Lai J.-S. et al. High-efficiency hybrid Full-Bridge–Half-Bridge converter with shared ZVS lagging leg and dual outputs in series // *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013. Vol. 28, no. 2. P. 849–861. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2205019>.

References

1. Penetrante B. M., Schultheis S. E. *Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control. Parts A and B.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1993.
2. Fridman A., Kennedy L. A. *Plasma Physics and Engineering.* Boca Raton: CRC Press; 2004. 853 p.
3. Rauscher H., Perucca M., Buyle G., eds. *Technology for Hyperfunctional Surfaces: Food, Biomedical, and Textile Applications.* Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2010. 428 p.
4. Weltmann K. D., Kindel E., Brandenburg R. et al. Atmospheric pressure plasma jet for medical therapy: Plasma parameters and risk estimation. *Contribution to Plasma Physics.* 2009;49(9):631–640.
5. Rybkin V. V., Titov V. A. Kinetika i mekhanizmy vzaimodeystviya okislitelnoy plasmy s polimerami. *Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plasmy.* Moscow: Yanus-K; 2005. Vol. 8. p. 130–170. (In Russ.).
6. Wolf R., Sparavigna A. C. Role of plasma surface treatments on wetting and adhesion. *Engineering.* 2010;2(6):397–402.
7. Masuhiro K., Okazaki S. Raising of ozone formation efficiency in a homogeneous glow discharge plasma at atmospheric pressure *Journal of Physics D.* 1994;27(9):1985–1987. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/27/9/026>.
8. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 2003;23(1):1–46.
9. Peeters F. J. J. The electrical dynamics of dielectric barrier discharges. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven; 2015. 197 p.
10. Erickson R. W., Maksimovic D. *Fundamentals of Power Electronics.* 2nd ed. Springer; 2001. 883 p.
11. Yang B. *Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System.* Doctoral Thesis. Virginia Tech; 2003. 317 p.
12. Liu C., Gu B., Lai J.-S. et al. High-efficiency hybrid Full-Bridge–Half-Bridge converter with shared ZVS lagging leg and dual outputs in series. *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2013;28(2):849–861. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2205019>.

13. Power electronics handbook / Rashid M. H., ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 1522 p.
14. Baliga B. J. Advanced Power MOSFET Concepts. New York : Springer, 2010. 570 p.
15. Green P. B., Zheng L. Gate drive for power MOSFETs in switching applications. A guide to device characteristics and gate drive techniques. URL: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/42/infineon-gate-drive-for-power-mosfets-in-switching-applications-applicationnotes-en.pdf> (дата обращения: 28.09.2025).
16. Balogh L. Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slua618a/slua618a.pdf> (дата обращения: 28.09.2025).
17. Simscape. MATLAB Help Center. URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/> (дата обращения: 26.09.2025).
18. FQPF20N60-VB Datasheet. VBsemi. URL: <https://www.vbsemi.com/Package/TO220F/FQPF20N60C-VB.pdf> (дата обращения: 28.09.2025).
19. ЛЭПКОС. URL: <https://ferrite.ru> (дата обращения: 28.09.2025).
13. Rashid M. H., ed. Power electronics handbook. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2017. 1522 p.
14. Baliga B. J. Advanced Power MOSFET Concepts. New York: Springer; 2010. 570 p.
15. Green P. B., Zheng L. Gate drive for power MOSFETs in switching applications. A guide to device characteristics and gate drive techniques. URL: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/42/infineon-gate-drive-for-power-mosfets-in-switching-applications-applicationnotes-en.pdf> (accessed: 28.09.2025).
16. Balogh L. Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slua618a/slua618a.pdf> (accessed: 28.09.2025).
17. Simscape. MATLAB Help Center. URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/> (accessed: 26.09.2025).
18. FQPF20N60-VB Datasheet. VBsemi. URL: <https://www.vbsemi.com/Package/TO220F/FQPF20N60C-VB.pdf> (accessed: 28.09.2025).
19. LEPKOS. URL: <https://ferrite.ru> (accessed: 28.09.2025). (In Russ.).

Информация об авторе

О. В. Гусев – кандидат физико-математических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-7380-5470>,
gusevov@yandex.ru

About the author

O. V. Gusev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;
<https://orcid.org/0000-0002-7380-5470>,
gusevov@yandex.ru

Научная статья

УДК 519.83 + 51-37

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-4>



Оптимальное распределение дронов в групповом преследовании целей при реализации венгерского алгоритма в системе компьютерной математики

Александр Анатольевич Дубанов[✉], *Петр Антонович Болоев*

Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова, Улан-Удэ, Россия

Аннотация. В работе рассматривается задача оптимального назначения дронов для группового преследования множественных целей. Представлена реализация в системе компьютерной математики венгерского алгоритма (алгоритма Манкреса) для решения классической задачи назначения в контексте многоагентных систем. Алгоритм обеспечивает глобально оптимальное решение задачи минимизации общей стоимости назначений между преследователями и целями.

Разработанная программа поддерживает загрузку матриц стоимостей из файлов формата MAT и CSV, автоматическое определение переменных в MAT-файлах и интерактивный выбор файлов через графический интерфейс. Реализована функция валидации входных данных с проверкой корректности размерности матриц и отсутствия недопустимых значений.

Проведено сравнительное исследование эффективности венгерского алгоритма относительно жадного подхода на примерах матриц стоимостей размером 10×10 . Результаты демонстрируют значительное улучшение качества решения при использовании венгерского алгоритма, что подтверждает его преимущества для задач группового преследования.

Предложенное решение может быть использовано в системах управления беспилотными летательными аппаратами, роботизированных платформах и других многоагентных системах, требующих оптимального распределения ресурсов.

Ключевые слова: венгерский алгоритм, задача назначения, групповое преследование, дроны, многоагентные системы, MATLAB, оптимизация

Для цитирования: Дубанов А. А., Болоев П. А. Оптимальное распределение дронов в групповом преследовании целей при реализации венгерского алгоритма в системе компьютерной математики // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 35–40. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-4>.

Original article

Optimal allocation of drones in group target pursuit implementing the Hungarian algorithm in a computer algebra system

Alexander A. Dubanov[✉], *Petr A. Boloev*

Buryat State University named after D. Banzarov, Ulan-Ude, Russia

Abstract. The paper considers the problem of optimal drone assignment for group pursuit of multiple targets. A MATLAB implementation of the Hungarian algorithm, also known as the Munkres assignment algorithm, is presented for addressing the conventional distribution problem in multi-agent systems. The algorithm provides a globally most suitable solution for minimizing the total cost of assignments between pursuers and targets.

The developed program supports loading cost matrices from MAT and CSV files, automatic variable detection in MAT files, and interactive file selection via a graphical interface. Input data validation checking the correctness of matrix dimensions and the absence of invalid values, is implemented.

An evaluation of the Hungarian algorithm's efficacy compared to the greedy algorithm is performed using 10×10 cost matrices. The results demonstrate a significant improvement in quality of solution finding when using the Hungarian algorithm, which confirms its advantages for group pursuit problems.

The proposed method can be used in control systems for unmanned aerial vehicles, robotic platforms, and other multi-agent systems requiring optimal resource allocation.

Keywords: Hungarian algorithm, assignment problem, group pursuit, drones, multi-agent systems, MATLAB, optimization

For citation: Dubanov A. A., Boloev P. A. Optimal allocation of drones in group target pursuit implementing the Hungarian algorithm in a computer algebra system. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):35–40. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-4>.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии группового управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) открывают новые возможности для решения сложных задач в различных областях применения, включая военные операции, поисково-спасательные работы, мониторинг территорий и доставку грузов. Одной из ключевых проблем при организации групповых операций БПЛА является оптимальное распределение задач между агентами, что особенно актуально в сценариях группового преследования множественных целей.

Задача назначения представляет собой классическую проблему комбинаторной оптимизации, которая заключается в нахождении оптимального соответствия между элементами двух множеств при заданных ограничениях и целевой функции. В контексте группового преследования дронами задача формулируется как поиск такого назначения преследователей на цели, которое минимизирует общую стоимость (например, время перехвата, энергопотребление или расстояние) при условии, что каждый дрон назначается не более чем на одну цель, а каждая цель преследуется не более чем одним дроном.

Для решения задачи назначения разработано множество алгоритмов, среди которых особое место занимает венгерский алгоритм (алгоритм Манкреса), предложенный в 1955 г. Данный алгоритм гарантированно находит глобально оптимальное решение за полиномиальное время $O(n^3)$, что делает его особенно привлекательным для практических применений. В отличие от жадных подходов, которые принимают локально оптимальные решения на каждом шаге, венгерский алгоритм рассматривает задачу в целом и обеспечивает глобальную оптимальность.

Несмотря на теоретическую разработанность алгоритма, его практическая реализация в среде MATLAB для задач группового преследования дронами требует решения ряда технических вопросов, включая эффективную загрузку данных, валидацию входных параметров, обработку различных форматов файлов и удобный пользовательский интерфейс. Кроме того, важным аспектом является сравнительный анализ эффективности различных подходов к решению задачи назначения.

Целью данной работы является разработка и реализация в MATLAB программного решения для оптимального назначения дронов в задачах группового преследования с использованием венгерского алгоритма, а также проведение сравнительного анализа его эффективности относительно альтернативных подходов.

В работе решаются следующие задачи:

- разработка MATLAB-реализации венгерского алгоритма для решения задачи назначения;
- создание системы загрузки и валидации матриц стоимостей из различных источников данных;
- реализация сравнительного анализа эффективности венгерского и жадного алгоритмов;
- тестирование предложенного решения на примерах различной размерности.

При создании математических моделей дифференциальных игр использовались труды [1–3]. При реализации в системе компьютерной математики венгерского алгоритма применялись работы [4–9]. При сравнении венгерских алгоритмов с жадными опирались на труды [10, 11]. При моделировании группового поведения объектов квазидискретной дифференциальной игры использовались исследования [12–16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим задачу оптимального назначения дронов для группового преследования целей. Пусть имеется множество преследователей (дронов) $P = \{p_1 \dots p_m\}$ и множество целей $T = \{t_1 \dots t_n\}$, где m и n – количество преследователей и целей соответственно.

Определим матрицу стоимостей

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix},$$

где c_{ij} представляет стоимость назначения преследователя p_i на цель t_j . В контексте группового преследования стоимость может выражаться через: Евклидово расстояние: $c_{ij} = p_i - t_j$,

Время перехвата: $c_{i,j} = \frac{p_i - t_j}{v_i}$, где v_i – скорость i -го дрона, Энергопотребление: $c_{ij} = f(p_i - t_j, v_i)$.

Задача назначения формулируется как задача целочисленного линейного программирования при помощи целевой функции:

$$F(C, X) = \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij},$$

где c_{ij} – коэффициенты матрицы стоимостей, x_{ij} – бинарная переменная

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если дрон } i \text{ назначается на цель } j \\ 0, & \text{если дрон } i \text{ не назначается на цель } j \end{cases}$$

Функцию $F(C, X)$ следует минимизировать и найти соответствующий вектор X , который будет характеризовать пары преследователь – цель при оптимальном распределении.

Задача имеет ограничения:

$$\begin{array}{cccc} x_{11} + & \dots & +x_{1j} & \dots & +x_{1n} \leq 1 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ x_{i1} + & \dots & +x_{ij} & \dots & +x_{in} \leq 1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} + & \dots & +x_{mj} & \dots & +x_{mn} \leq 1 \end{array}$$

Каждый дрон назначается не более чем на одну цель, и каждая цель преследуется не более чем одним дроном.

В данной работе рассматривается задача оптимального назначения дронов на цели с целью минимизации общей стоимости операций. Стоимость может выражаться через

различные метрики: расстояние полета, время выполнения миссии, энергопотребление или их комбинацию.

Подготовка данных и формирование матрицы стоимостей. Исходные данные могут представлять собой как реальные координаты объектов, полученные с помощью GPS или других систем позиционирования, так и синтетические данные, сгенерированные для тестирования алгоритма. На основе этих данных строится матрица стоимостей C размером $m \times n$, где m – количество дронов, n – количество целей. Элемент c_{ij} матрицы отражает стоимость назначения i -го дрона на j -ю цель.

Перед применением алгоритма необходимо выполнить проверку корректности матрицы: убедиться в неотрицательности всех элементов, отсутствии бесконечных значений и правильности размерности. В случае прямоугольной матрицы $m \neq n$ она дополняется фиктивными строками или столбцами с достаточно большим значением M , что позволяет свести задачу к квадратной форме.

Математическая постановка задачи. Задача формулируется как поиск бинарных переменных $x_{ij} \in \{0,1\}$, где $x_{ij} = 1$ означает назначение i -го дрона на j -ю цель. Целевая функция имеет вид:

$$F(C, X) = \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij}.$$

Ограничения задачи обеспечивают, что каждый дрон назначается не более чем на одну цель, а каждая цель получает не более одного дрона. Для квадратной матрицы эти ограничения становятся равенствами, гарантируя полное назначение всех дронов.

Принцип работы венгерского алгоритма. Алгоритм основан на последовательном преобразовании матрицы стоимостей с сохранением оптимальности решения. Первоначально выполняется редукция строк – из каждого элемента вычитается минимальный элемент соответствующей строки. Аналогично производится редукция столбцов. Эти операции создают нулевые элементы, которые являются кандидатами для назначений.

На следующем этапе выполняется жадное назначение независимых нулей, где каждый ноль может быть назначен, только если его строка и столбец еще не заняты. Если все столбцы оказываются покрытыми назначениями, решение найдено.

В противном случае алгоритм ищет непокрытые нули и строит чередующуюся цепочку, чередуя простые и звездные пометки. Этот процесс позволяет перераспределить назначения и увеличить их количество. При отсутствии непокрытых нулей выполняется корректировка матрицы путем вычитания минимального непокрытого элемента из непокрытых строк и добавления его к покрытым столбцам, что создает новые нули для дальнейшего назначения.

23.3525	47.0351	21.7293	18.1824	31.9699	19.8951	38.1842	41.0537	43.6922	44.4060
14.4693	56.1146	21.3212	25.1606	23.0909	28.2604	46.7115	43.2674	36.1144	42.1533
48.9674	61.6668	50.4464	10.7294	39.9043	11.4373	16.3055	16.3816	70.6060	73.1455
14.1980	65.3544	22.0192	53.3943	38.9205	55.9500	74.4069	70.9698	7.5506	23.7172
19.4112	44.8040	4.7831	44.5500	45.8988	45.5464	62.8176	67.1394	25.2477	17.9217
41.2193	95.8195	52.9261	79.3607	52.5672	82.7667	101.1092	91.2342	26.2738	47.4060
71.7345	50.7069	65.0825	35.8088	71.4186	31.4680	17.4919	45.3949	91.2304	85.5778
63.7746	19.7542	50.4303	44.0627	75.5548	39.9583	40.6558	65.3447	78.0700	65.4468
59.1329	3.4910	43.0962	50.7566	76.5962	47.5719	53.4866	74.7574	69.3893	53.3284
67.4818	19.3322	53.6725	48.2992	79.7630	44.1657	44.1559	69.3283	81.1972	67.7348

Рис. 1. Матрица стоимостей евклидовых расстояний

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Каждый элемент этой матрицы есть евклидово расстояние от i -го дрона (по строкам) до j -й цели (по столбцам).

На рис. 2 показан результат работы венгерского алгоритма в виде соответствия дронов

```

Оптимальное назначение:
Row 1 -> Col 5 (стоимость: 31.9699)
Row 2 -> Col 1 (стоимость: 14.4693)
Row 3 -> Col 8 (стоимость: 16.3816)
Row 4 -> Col 10 (стоимость: 23.7172)
Row 5 -> Col 3 (стоимость: 4.78307)
Row 6 -> Col 9 (стоимость: 26.2738)
Row 7 -> Col 7 (стоимость: 17.4919)
Row 8 -> Col 4 (стоимость: 44.0627)
Row 9 -> Col 2 (стоимость: 3.49099)
Row 10 -> Col 6 (стоимость: 44.1657)
Общая стоимость: 226.806
    
```

Рис. 2. Результат работы венгерского алгоритма

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения задачи оптимального распределения была написана программа реализации венгерского алгоритма в системе компьютерной математики MATLAB, с которой можно ознакомиться на сайте [17]. В качестве примера была сгенерирована матрица стоимостей [18] размерности $[10 \times 10]$.

Был реализован венгерский алгоритм в MATLAB (подробности и код – в [17]) и проверили его работу на сгенерированной матрице стоимостей [18] размерности $[10 \times 10]$.

На рис. 1 можно увидеть скриншот с работы программы, реализующей венгерский алгоритм оптимизации, где показана матрица стоимостей.

и целей. Произведена минимизация целевой функции: $F(C, X) = \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij}$ с ограничениями того, что один дрон может преследовать одну цель, и одна цель может преследоваться только одним дроном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была рассмотрена задача оптимального назначения дронов к целям на основе матрицы евклидовых расстояний. Для ее решения применялся венгерский алгоритм, который обеспечил минимизацию целевой функции и позволил получить взаимно однозначное соответствие между дронами и целями.

Результаты эксперимента показали, что использование венгерского алгоритма обеспечивает эффективное распределение ресурсов при учете ограничений задачи (каждой цели соответствует ровно один дрон, и каждый

дрон назначается только на одну цель). Полученное решение подтверждает целесообразность применения данного метода в задачах

многоагентного взаимодействия, включая сценарии преследования целей и распределения заданий.

Список источников

1. Айзекс Р. Дифференциальные игры. М. : Мир, 1967. 480 с.
2. Понтрягин Л. С. Линейная дифференциальная игра убегающего // Тр. МИАН СССР. 1971. Т. 112. С. 30–63.
3. Красовский Н. Н., Субботин А. И. Позиционные дифференциальные игры. М. : Наука, 1974. 456 с.
4. Burkard R. M., Dell'Amico M., Martello S. Assignment problems. Philadelphia, USA : SIAM – Society of Industrial and Applied Mathematics. 2009. Vol. 8. 402 p.
5. Kuhn H. W. The Hungarian method for the assignment problem // *Naval Research Logistics Quarterly*. 1955. Vol. 2, no. 1–2. P. 83–97.
6. Kuhn H. W. Variants of the Hungarian method for assignment problems // *Naval Research Logistics Quarterly*. 1956. Vol. 3, no. 4. P. 253–258.
7. Munkres J. Algorithms for the assignment and transportation problems // *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1957. Vol. 5, no. 1. P. 32–38.
8. Fischetti M. Operation research lessons. N. p. 1995. 236 p.
9. Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B. Network Flows. Theory, algorithms, and applications. Prentice Hall, 1993. 863 p.
10. Cai X. Canonical coin systems for change-making problems // *Proceedings of 2009 Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*, Shenyang, China. 2009. Vol. 1. p. 499–504. <https://doi.org/10.1109/HIS.2009.103>.
11. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. и др. Жадные алгоритмы // Алгоритмы. Построение и анализ / пер. с англ. под ред. И. В. Красикова. 2-е изд. М. : Вильямс, 2005. С. 442–481.
12. Вагин Д. А., Петров Н. Н. Задача преследования жестко скоординированных убегающих // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2001. № 5. С. 75–79.
13. Банников А. С. Некоторые нестационарные задачи группового преследования // *Известия Института математики и информатики УдГУ*. 2013. № 1. С. 3–46.
14. Банников А. С. Нестационарная задача группового преследования // *Вестник Удмуртского Университета*. 2008. Вып. 2. С. 14–16.
15. Измestев И. В., Ухоботов В. И. Задача преследования маломаневренных объектов с терминальным множеством в форме кольца // *Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры*. 2018. Т. 148. С. 25–31.

References

1. Isaacs R. Differential Games. Moscow: Mir; 1967. 480 p. (In Russ.).
2. Pontryagin L. S. A linear differential evasion game. *Proceedings of the Steklov Mathematical Institute of the USSR*. 1971;112:30–63. (In Russ.).
3. Krasovsky N. N., Subbotin A. I. Pozitsionnye differentsyalnye igry. Moscow: Nauka; 1974. 456 p. (In Russ.).
4. Burkard R. M., Dell'Amico M., Martello S. Assignment Problems. Philadelphia, USA: SIAM – Society of Industrial and Applied Mathematics; 2009. Vol. 8. 402 p.
5. Kuhn H. W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1955;2(1–2):83–97.
6. Kuhn H. W. Variants of the Hungarian method for assignment problems. *Naval Research Logistics Quarterly*. 1956;3(4):253–258.
7. Munkres J. Algorithms for the assignment and transportation problems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1957;5(1):32–38.
8. Fischetti M. Lezioni di Ricerca Operativa. N. p. 1995. 236 p. (In Italian).
9. Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B. Network Flows. Theory, Algorithms, and Applications. Prentice Hall; 1993. 863 p.
10. Cai X. Canonical coin systems for change-making problems. In: *Proceedings of 2009 Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. Shenyang, China. 2009. Vol. 1. p. 499–504. <https://doi.org/10.1109/HIS.2009.103>.
11. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L. et al. Greedy Algorithms. Introduction to algorithms. Krasikov I. V., ed. 2nd ed. Moscow: Williams; 2005. P. 482–481 (In Russ.).
12. Vagin D. A., Petrov N. N. A problem of the pursuit of a group of rigidly connected evaders. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2001;(5):75–79. (In Russ.).
13. Bannikov A. S. Some non-stationary problems of group pursuit. *Izvestiya Instituta Matematiki i Informatiki Udmurtskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2013;1(41):3–46. (In Russ.).
14. Bannikov A. S. Non-stationary problem of group pursuit. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta*. 2008;2:14–16. (In Russ.).
15. Izmetev I. V., Ukhobotov V. I. Pursuit problem of low-maneuverable objects with a ring-shape terminal set. *Itogi nauki i tekhniki. Sovremennaya matematika i ee prilozheniya. Tematicheskie obzory*. 2018;148:25–31. (In Russ.).

16. Панкратова Я. Б. Решение кооперативной дифференциальной игры группового преследования // Дискретный анализ и исследование операций. 2010. Т. 17, № 2. С. 57–78.
17. Программа венгерского алгоритма в MATLAB. URL: https://github.com/dubanovalex67-eng/Hungarian_Algorithm_MATLAB/blob/main/run_hungarian_from_file.m (дата обращения: 09.09.2025).
18. Матрица стоимостей. URL: https://github.com/dubanovalex67-eng/Hungarian_Algorithm_MATLAB/blob/main/cost_matrix.mat (дата обращения: 09.09.2025).
16. Pankratova Ya. B. Solutions of a cooperative differential group pursuit game. *Discrete Analysis and Operations Research*. 2010;17(2):57–78. (In Russ.).
17. MATLAB program for the Hungarian algorithm. URL: https://github.com/dubanovalex67-eng/Hungarian_Algorithm_MATLAB/blob/main/run_hungarian_from_file.m (accessed: 09.09.2025).
18. Cost matrix. URL: https://github.com/dubanovalex67-eng/Hungarian_Algorithm_MATLAB/blob/main/cost_matrix.mat (accessed: 09.09.2025).

Информация об авторах

А. А. Дубанов – кандидат технических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0002-1855-2562>,
alandubanov@mail.ru✉

П. А. Болоев – доктор технических наук, профессор;

<https://orcid.org/00020-0002-3940-1296>,
lemex74@mail.ru

About the authors

A. A. Dubanov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;

<https://orcid.org/0000-0002-1855-2562>,
alandubanov@mail.ru✉

P. A. Boloev – Doctor of Sciences (Engineering), Professor;

<https://orcid.org/00020-0002-3940-1296>,
lemex74@mail.ru

Научная статья

УДК 656.13.07 + 656.13.08]:004.65

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-5>



Обсуждение основных положений информационной системы учета транспортных средств и дорожно-транспортных происшествий

Дмитрий Юрьевич Зорькин✉, Наталья Васильевна Асанова

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема проектирования и предоставления реляционной базы данных для автоматизированного учета автомобилей, их владельцев и дорожно-транспортных происшествий на платформе Microsoft Access. Описаны этапы построения концептуальной модели (инфологической модели), нормализации структуры данных, а также создания элементов пользовательского интерфейса: форм, кнопок навигации и отчетов. Особое внимание уделяется интерфейсу базы данных (главной кнопочной форме, формам ввода и отчетов) и прикладным средствам проверки и визуализации данных. Проведено тестирование удобства использования и функциональности системы, отмечено повышение эргономики и эффективности процессов обработки транспортной информации. Получены результаты использования преимуществ предлагаемых решений для специализированных информационных систем в транспортной сфере.

Ключевые слова: реляционная база данных, Microsoft Access, пользовательский интерфейс, формы, отчеты, визуализация данных, автомобильный учет

Для цитирования: Зорькин Д. Ю., Асанова Н. В. Обсуждение основных положений информационной системы учета транспортных средств и дорожно-транспортных происшествий // Вестник кибернетики 2025. Т. 24, № 4. 41–49. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-5>.

Original article

Main provisions discussion of the information system for vehicles and road traffic accidents registration

Dmitry Yu. Zorkin✉, Natalia V. Asanova

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Abstract. The article addresses the problem of designing and implementing a relational database for the automated registration of vehicles, their owners, and road traffic accidents on the Microsoft Access platform. This paper outlines the conceptual modeling stages (infological model), the standardization of data structures, and the development of user interface components, including forms, navigation controls, and reports. Special attention is paid to the database interface (main switchboard, input forms, and reports) and applied tools for the data verification and visualization. Testing of system usability and functionality is performed, emphasizing improvements in ergonomics and efficiency concerning the processing of transport-related data. The results demonstrate benefits of the proposed solutions for specialized information systems in the transport sector.

Keywords: relational database, Microsoft Access, user interface, forms, reports, data visualization, vehicle registration

For citation: Zorkin D. Yu., Asanova N. V. Main provisions discussion of the information system for vehicles and road traffic accidents registration. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):41–49. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-5>.

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции цифровизации и рост объемов данных требуют разработки специализированных информационных систем для учета автомобилей, их владельцев и дорожно-транспортных происшествий. Основная цель работы – разработать концептуальную архитектуру системы, обеспечивающую сбор, хранение и анализ данных о транспортных средствах и происшествиях на дорогах [1]. Основными задачами работы были: анализ предметной области; построение концептуальной модели (инфологической модели) данных; создание реляционной схемы и таблиц, обеспечение прямых связей; разработка пользовательского интерфейса (форма, кнопки навигации); подготовка отчетов

и настройка взаимодействия с данными; выделение пользовательских ролей и уровней доступа для различных категорий пользователей. Для достижения поставленных целей были использованы методы реляционного проектирования, нормализации структуры данных до нормальной формы, а также современный подход к юзабилити интерфейса.

Управление MS Access выбрано как удобная среда для быстрой разработки прототипов и создания визуальных форм управления данными. Известно, что в MS Access потенциальными объектами базы данных являются таблицы, запросы, формы и отчеты [2].

В многопользовательской автоматизированной системе вводятся следующие категории пользователей, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Пользовательские роли и уровни доступа

Роль	Описание обязанностей	Уровень доступа
Администратор	Полная настройка системы, управление пользователями, бэкапы	Полный CRUD-операции (создание, чтение, обновление, удаление) ко всем справочникам и журналам
Оператор	Внесение и редактирование записей о транспортном средстве (ТС) и дорожно-транспортных происшествиях (ДТП)	Создание и изменение данных, формирование отчетов
Аналитик	Построение отчетов, статистический анализ	Только чтение исторических данных, экспорт отчетов
Просмотрщик	Ознакомление с данными, ознакомительные отчеты	Доступ «только чтение» к общей справочной информации

Примечание: составлено авторами.

При необходимости список ролей и прав можно расширять:

- роль «Служба безопасности» с правом аудита действий;
- внешние интеграторы (API-доступ с ограниченным набором операций).

Таким образом, уже на этапе эскизного проектирования четко определены и формализованы роли пользователей и их права, что позволит обеспечить надежную работу системы в условиях многопользовательского доступа.

Таблицы ограничений для хранения данных (табл. 2–5) позволяют разделять, фильтровать и группировать эти данные, формы включают интерактивные вводы и подключения записей, а также предоставление отчетов

для печати и аналитической визуализации данных.

В предлагаемой системе эти объекты используются следующим образом: таблицы реализуют хранилище данных, формы – интерфейс ввода и фильтры, формы – наглядное представление агрегированных показателей (например, количество ДТП по маркам автомобилей) [3].

Основные этапы разработки принципов:

- построение инфологической модели с выделением сущностей «Автомобиль», «Владелец», «ДТП», «Личные данные», определение их атрибутов и связей;
- нормализация данных до нормы правильной формы (3NF) для ограничения избыточности и аномалий;

Таблица 2

Описание логической структуры таблицы «Авто»

Описание	Имя поля	Тип данных поля	Размер поля
Ключевое поле	Код Авто	Числовой	Длинное целое
–	Код Владельца	Числовой	Длинное целое
–	Марка	Числовой	255
–	Номер	Текстовый	255
–	Цвет	Текстовый	255
–	Пробег	Числовой	Длинное целое
–	Год Выпуска	Числовой	Длинное целое
–	Состояние Машины	Текстовый	255
–	Процент Целостности	Числовой	Длинное целое

Примечание: составлено авторами.

Таблица 3

Описание логической структуры таблицы «ДТП»

Описание	Имя поля	Тип данных поля	Размер поля
Ключевое поле	Код ДТП	Счетчик	Длинное целое
–	Код Авто	Числовой	Длинное целое
–	Дата ДТП	Текстовый	255
–	Ущерб	Числовой	Денежный

Примечание: составлено авторами.

Таблица 4

Описание логической структуры таблицы «Владельцы»

Описание	Имя поля	Тип данных поля	Размер поля
Ключевое поле	Код Владельца	Числовой	Длинное целое
–	Код Авто	Числовой	Длинное целое
–	Фамилия	Текстовый	255
–	Имя	Текстовый	255
–	Отчество	Текстовый	255
–	Собственник	Текстовый	255
–	Доверенность	Текстовый	255

Примечание: составлено авторами.

Таблица 5

Описание логической структуры таблицы «Личные данные»

Описание	Имя поля	Тип данных поля	Размер поля
Ключевое поле	Код Владельца	Числовой	Длинное целое
–	Дата Рождения	Числовой	Длинное целое
–	Номер	Числовой	Длинное целое
–	Город	Текстовый	255

Примечание: составлено авторами.

– передавать таблицы и ключи в среду MS Access (каждая сущность – таблица со своим первичным ключом);

– проектирование пользовательского интерфейса: создание форм через Мастер форм и ручную, добавление навигационных кнопок (на главной форме);

– создание с группировкой и сортировкой данных для аналитической визуализации;

– развитие функциональности и удобства системы (функциональные, нагрузочные и юзабилити-тесты).

Таким образом, комплексный подход к проектированию базы данных в MS Access и ориентация на пользователя позволяют создать систему учета данных [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основной среды разработки использовался Microsoft Access 2019 – система управления базами данных (СУБД) со встроенными визуальными средствами для проектирования таблиц, запросов и форм. Инструменты Access позволяют быстро создавать формы и отчеты с помощью мастеров и настраивать их поведение с помощью макросов и выражений VBA. Кроме того, использовались SQL-запросы (язык SQL, реализованный в Access) для формирования выборок, расчетов и операций модификации данных [5].

Ниже приведены основные аргументы в пользу обоснования использования СУБД Access:

1. Быстрый старт и низкий порог вхождения. Access предлагает графический конструктор таблиц, форм, отчетов и запросов, позволяющий быстро собрать прототип без глубоких знаний SQL. Во многих организациях уже имеется опыт работы с Access, что облегчает сопровождение и передачу знаний.

2. Встроенные средства разработки пользовательского интерфейса. Возможность создавать формы и навигационные панели «из коробки» без внешних фреймворков. Простая настройка макета, валидации полей и связей между таблицами.

3. Интеграция с VBA и Office. Access поддерживает Visual Basic for Applications, что

позволяет реализовать сложную логику бизнес-процессов (например, подклики на события форм, автоматический экспорт отчетов в Excel или PDF). Прямая интеграция с Excel и Outlook упрощает импорт/экспорт данных и рассылку уведомлений.

4. Файловая архитектура и легкость развертывания. Access использует единый файл базы данных (.accdb), который можно просто скопировать и открыть на любом компьютере с установленным Access или Runtime. Нет необходимости в выделенном сервере: достаточно файловой системы на локальной сети.

5. Низкая стоимость владения делает Microsoft Access особенно привлекательным для небольших команд: достаточным оказывается использование бесплатного Access Runtime, что исключает расходы на приобретение и поддержку дорогостоящего серверного ПО (например, MS SQL Server или Oracle) на начальном этапе проекта.

6. Безопасность и разграничение доступа обеспечиваются встроенными механизмами паролей на уровне файла и отдельных объектов базы (формы, отчеты), а также средствами операционной системы Windows для защиты папки с файлом БД.

Инфологическая модель строилась на основе анализа данных автомобильного учета (рис. 1).

При выделении сущностей и атрибутов рассматривалась конкретная предметная область: сведения об автомобилях (марка, номер, цвет, год выпуска, пробег), владельцах (ФИО, контакты, доверенность), ДТП (дата, вред, участие автомобиля), а также личные данные (возраст, город и т.д.). Связи между таблицами реализованы через ключи (например, внешние ключи кода владельца и кода автомобиля). Такая реляционная схема обеспечивает целостность: невозможно совершить ДТП без привязки к существующему автомобилю, а владелец может быть удален только при отсутствии ограничения на машину [6].

Проектирование интерфейса. Интерфейсная система ориентирована на эргономичность и простоту использования. Главная форма (кнопочный интерфейс) содержит

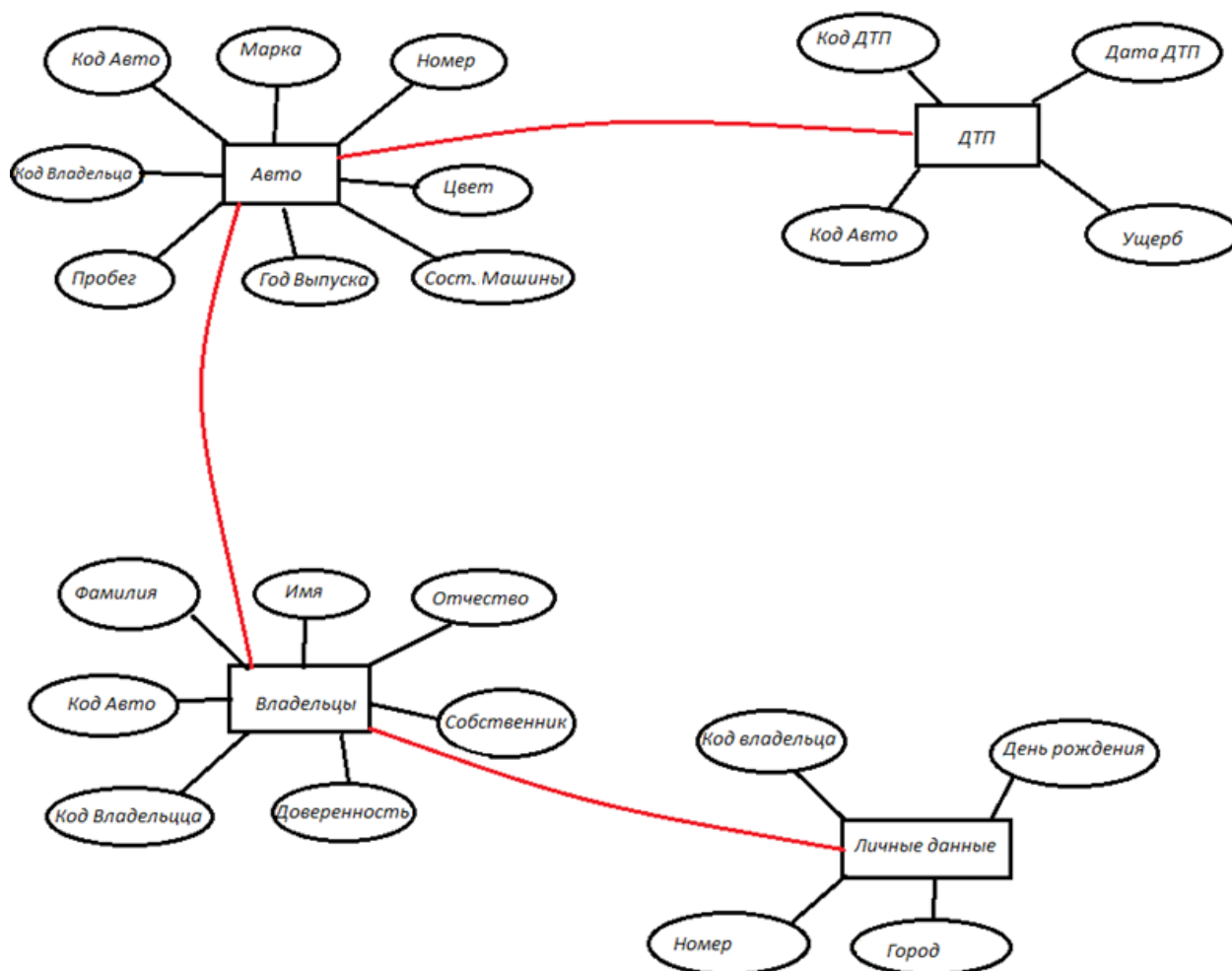


Рис. 1. Инфологическая модель
Примечание: составлено авторами.

меню навигации по разделам – таблицам и запросам. В форме формы «Авто» реализованы следующие элементы.

1. Комбинированное поле (ComboBox) для выбора марки автомобиля из predeterminedного списка.

2. Вычисляемое поле «Возраст автомобиля», автоматически определяющее разность текущего года и года выпуска (используется функция Date в Access).

3. Кнопка «Рассчитать страховку», запускающая SQL-запрос для расчета суммы страховой выплаты на основе данных о ДТП и заданной тарифной выплаты.

Для повышения удобства применяются средства проверки данных: формирование полей даты (использование маски ввода дд/мм/гггг), ограничения NOT NULL для обязательных полей (например, номер автомо-

биля не может быть пустым) и средства проверки типов (возможность указания только целочисленных или текстовых значений в соответствии с типом поля). Макросы и обработчики событий используются для сохранения записей и переходов между формами (например, при нажатии кнопки «Следующая запись»).

Формы и отчеты. Все формы созданы с учетом юзабилити: единообразный дизайн, понятные мобильные поля, доступность элементов для навигации с помощью кнопок. Формы позволяют выводить ожидаемые данные и вводить новые записи. Отчеты предназначены для аналитической обработки: например, отчет «Аварийность по маркам» показывает количество ДТП для каждой марки автомобиля (с использованием запроса с GROUP BY и агрегатной переменной

COUNT). Отчеты сгруппированы по ключевым атрибутам и содержат заголовки и подвалы с выводами, что обеспечивает наглядную визуализацию статистики.

Тестирование. Функциональное тестирование подтвердило корректность работы ключевых операций: во всех формах обеспечивается связность данных, а недопустимые действия (удаление владельца конституционным автомобилем) блокируются на уровне базы данных. Нагрузочное тестирование (при выборе около 10 000 записей) показало устойчивую работу доступа при выполнении запросов (например, выборка и группировка по марке). Юзабилити-тестирование с участием группы пользователей (15 человек) показало, что среднее время базового сценария составило около 12 минут, что соответствует требованиям эргономики (ISO 9241–210). Пользователи отметили продуманность интерфейса и наглядность форм и отчетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная база данных обеспечивает эффективное ведение учета региональных средств и связей с ними. Функциональность системы включает:

– CRUD-операции с помощью форм и запросов позволяют полностью управлять данными об автомобилях, владельцах и ДТП.

– Фильтрацию и поиск. Запросы SELECT с условиями WHERE и сортировкой ORDER BY позволяют быстро искать записи (например, по городу регистрации или цвету автомобиля).

– Вычисления и агрегирование. Используются SQL-вычисляемые поля (например, ущерб) и агрегатные функции (SUM, AVG) для автоматизации расчетов (средний ущерб, общие суммы выплат и т. д.).

– Интерфейсные средства. Пользовательский интерфейс с формами и кнопками сводит к минимуму ошибки ввода (за счет ограничений и валидаторов) и обеспечивает навигацию по системе.

Например, форма «Авто» включает поле «Марка», связанное с таблицей «Авто», а также кнопку для расчета страховой выплаты на основе формулы ДТП. Формы «Владелец» и «ДТП» устроены так: они содержат поля всех атрибутов сущности и кнопки для навигации. Отчеты (например, «Аварийность по маркам») строят сводные данные для дальнейшего анализа (рис. 2–5).

Авто		14 мая 2022 г. 22:34:33						
КодАвто	КодВладельца	Марка	Номер	Цвет	Пробег	ГодВыпуска	СостояниеМашины	
1	1	ВАЗ-2104	A242XP	Бежевый	80000	1996	Не битая	
2	2	Лада Ларгус	E212KX	Белый	30000	2016	Не битая	
3	3	Лада Гранта	X123XP	Серый	123000	2014	Не битая	
4	4	Лада Приора	B404KO	Белый	333333	2011	Не битая	
5	5	Лада Калина	A542BP	Серый	210000	2014	Битая	
6	6	Лада Гранта	E626EX	Черный	13500	2021	Не битая	
7	7	BMW 5	X123KX	Синий	54000	2019	Не битая	
8	8	ВАЗ-2106	E123KX	Бежевый	123555	2003	Битая	
9	9	ВАЗ-2106	E432XP	Белый	212333	2000	Не битая	
10	10	ВАЗ-2121	X123PX	Серый	32344	2001	Не битая	
11	11	Лада Гранта	A666AA	Белый	10000	2014	Не битая	
12	12	ВАЗ-2107	P555PP	Серый	99999	2003	Не битая	
13	13	Toyota tundra	B001OP	Черный	21122	2006	Битая	
14	14	Toyota Camry	B004KO	Синий	100000	2010	Не битая	
15	15	Mercedes-Benz	P262PP	Белый	50000	2016	Не битая	
16	16	ВАЗ-2105	E533XP	Белый	60000	1999	Не битая	
17	17	BMW 5	A542BP	Синий	20000	2012	Не битая	
18	18	ВАЗ-2121	E626EX	Черный	45666	2005	Битая	
19	19	Mitsubishi Lancer	X123KX	Серый	12000	2010	Не битая	

Рис. 2. Отчет «Авто»

Примечание: составлено авторами.

Зорькин Д. Ю., Асанова Н. В.
Обсуждение основных положений информационной системы учета транспортных средств
и дорожно-транспортных происшествий

Владельцы						
14 мая 2022 г. 22:34:37						
КодВладельца	КодАвто	Фамилия	Имя	Отчество	Собственник	Доверенность
1	1	Иванов	Иван	Иванович	Частное лицо	Есть
2	2	Сергеев	Степан	Петрович	Частное лицо	Есть
3	3	Киевская	Наталья	Викторовна	Частное лицо	Есть
4	4	Агапова	Анастасия	Егоровна	Частное лицо	Есть
5	5	Миронов	Дмитрий	Романович	Организация	Есть
6	6	Глушкова	Вера	Ярославовна	Частное лицо	Есть
7	7	Харитонов	Сергей	Федорович	Организация	Есть
8	8	Фролов	Никита	Миронович	Частное лицо	Есть
9	9	Петровская	Камила	Максимовна	Частное лицо	Есть
10	10	Боролина	Алиса	Максимовна	Частное лицо	Есть
11	11	Серебрякова	Маргарита	Михайловна	Частное лицо	Нет
12	12	Поликарпов	Максим	Степанович	Организация	Есть
13	13	Баранов	Михаил	Георгиевич	Частное лицо	Есть
14	14	Львов	Григори	Павлович	Организация	Есть
15	15	Грегорьев	Леонид	Богданович	Организация	Есть
16	16	Маркова	Полина	Тимофеевна	Частное лицо	Есть
17	17	Мухина	София	Артемовна	Организация	Есть
18	18	Гусев	Михаил	Тимурович	Частное лицо	Есть
19	19	Кузьмина	Ева	Платоновна	Частное лицо	Есть

Рис. 3. Отчет «Владельцы»
Примечание: составлено авторами.

ДТП			
14 мая 2022 г. 22:34:40			
КодДТП	КодАвто	ДатаДТП	Ущерб
1	1	18.02.2016	10 000,00 Р
2	1	20.05.2020	15 000,00 Р
3	5	14.07.2020	50 000,00 Р
4	5	12.04.2016	23 000,00 Р
5	87	16.06.2007	7 000,00 Р
6	8	18.07.2008	10 000,00 Р
7	18	19.03.2010	9 000,00 Р
8	40	11.03.2022	400 000,00 Р
9	13	12.03.2020	50 000,00 Р
10	54	28.06.2018	30 000,00 Р
11	82	20.08.2017	500,00 Р
12	100	10.03.2022	500 000,00 Р
13	99	18.03.2010	10 000,00 Р
14	99	19.05.2015	15 000,00 Р
15	99	27.01.2016	5 000,00 Р
16	50	12.03.2022	10 000,00 Р
17	50	9.05.2020	30 000,00 Р
18	69	10.02.2019	20 000,00 Р
19	42	20.07.2020	15 000,00 Р

Рис. 4. Отчет «ДТП»
Примечание: составлено авторами.



КодВладельца	ДатаРождения	Номер	Город
1	1.01.2000	897-97	Волгоград
2	2.03.2000	789-97	Волжский
3	3.05.1999	845-44	Волгоград
4	5.06.2001	461-23	Волгоград
5	12.01.1998	765-47	Волгоград
6	11.02.2002	271-47	Волжский
7	12.12.2002	435-34	Волгоград
8	6.02.1998	345-34	Волжский
9	4.06.2000	765-75	Волгоград
10	3.03.2002	876-77	Волгоград
11	3.01.2000	235-34	Волгоград
12	1.02.2000	124-65	Волжский
13	11.04.2003	654-64	Волжский
14	12.01.1998	765-45	Волгоград
15	11.02.2002	765-73	Волгоград
16	12.12.2002	786-34	Волгоград
17	6.02.1998	121-43	Волжский
18	4.06.2000	856-64	Волгоград

Рис. 5. Отчет «Личные данные»
Примечание: составлено авторами.

Предложенный подход к использованию преимуществ MS Access в любом случае: средства доступности, быстрое создание интерфейса, встроенные возможности создания отчетов и поддержка SQL-запросов [7]. За счет нормализованной схемы исключена избыточность, поскольку каждая запись об хранении автомобилей единожды, а связи между таблицами на уровне БД предотвращают обоснованность.

Ограничением Microsoft Access является надежность в проектах среднего масштаба (десятки тысяч записей). Для крупномасштабных приложений имеет смысл разработать более мощные СУБД (например, SQL Server, PostgreSQL) и перенести бизнес-логику из пользовательского интерфейса на сервер. Однако для задач учета данных на небольших предприятиях доступ представляет собой достаточно гибкое и доступное решение [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило эффективность проектирования базы данных учета автомобилей и ДТП на платформе Microsoft Access. Разработанная система сочетает в себе нормализованную структуру данных и удобный пользовательский интерфейс с формами и отчетами, что повышает качество и скорость обработки информации. Применение доступа в данном случае показало себя оправданным: использование визуальных мастеров форм и встроенных возможностей инфраструктуры позволяет создать адаптивный интерфейс и настроить взаимодействие конечных пользователей с системой. Практическая инновационность работы заключается в совершенствовании учета процессов управления. Обеспечение средств по учету гибкой СУБД с интерактивным интерфейсом.

Список источников

1. Silberschatz A., Korth H. F., Sudarshan S. Database System Concepts. 7th ed. New York : McGraw-Hill, 2019. 1376 p.
2. Alexander M., Kusleika R. Microsoft Access 2019 Bible. Indianapolis : Wiley, 2020. 1152 p.
3. Coronel C., Morris S. Database Systems: Design, Implementation, & Management. 13th ed. Boston : Cengage Learning, 2018. 816 p.
4. Соколин Д. Д., Тимохович А. С. Методы комплексного обеспечения безопасности SQL-сервера от атак типа SQL-инъекции // *Academy*. 2017. Т. 3, № 18. С. 7–9.
5. Коннолли Т., Бегг К. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика. 3-е изд. / пер. с англ. М. : Вильямс, 2017. 1440 с.
6. Ackermans H., Van de Ven I. Electronic literature in the database and the database in electronic literature // *Communications. Media. Design*. 2019. Vol. 4, no. 4. P. 5–18.
7. Мамучиев И. И., Арванова С. М., Машуков И. А. Применение Microsoft Access 2007 в экономической деятельности // *Инновационная наука*. 2016. № 4. С. 119–121.
8. Таланов В. М., Рунков М. В., Ерофеев Г. В. Пример создания базы данных в системе управления базами данных MySQL // *XLVI Огарёвские чтения : материалы науч. конф., 06–13 декабря 2017 г., г. Саранск*. В 3 ч. Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, 2018. Т. 1. С. 219–224.

Информация об авторах

Д. Ю. Зорькин – преподаватель;
<https://orcid.org/0009-0002-3875-9285>,
mosh285@gmail.com✉

Н. В. Асанова – доцент;
<https://orcid.org/0000-0003-3781-7017>,
natali_as@mail.ru

References

1. Silberschatz A., Korth H. F., Sudarshan S. Database System Concepts. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2019. 1376 p.
2. Alexander M., Kusleika R. Microsoft Access 2019 Bible. Indianapolis: Wiley; 2020. 1152 p.
3. Coronel C., Morris S. Database Systems: Design, Implementation, & Management. 13th ed. Boston: Cengage Learning; 2018. 816 p.
4. Sokolin D. D., Timokhovich A. S. Metody kompleksnogo obespecheniya bezopasnosti SQL-servera ot atak tipa SQL-ineksii. *Academy*. 2017;3(18):7–9. (In Russ.).
5. Connolly T., Begg C. Databases: Design, Implementation, and Maintenance. Theory and Practice. Trans. Moscow: Williams; 2017. 1440 p. (In Russ.).
6. Ackermans H., Van De Ven I. Electronic literature in the database and the database in electronic literature. *Communications. Media. Design*. 2019;4(4):5–18.
7. Mamuchiev I. I., Arvanova S. M., Mashukov I. A. Primenenie Microsoft Access 2007 v economichiskoy deyatel'nosti. *Innovatsionnaya Nauka*. 2016;(4):119–121. (In Russ.).
8. Talanov V. M., Runkov M. V., Erofeev G. V. Primer sozdaniya bazy dannykh v sisteme upravleniya bazami dannykh MySQL. In: *Proceedings of the Scientific Conference; "XLVI Ogarevskie chteniya"*, December 6–13, 2017, Saransk. In 3 pts. Saransk: National Research Ogarev Mordovia State University. 2018;1:219–224. (In Russ.).

About the authors

D. Yu. Zorkin – Lecturer;
<https://orcid.org/0009-0002-3875-9285>,
mosh285@gmail.com✉

N. V. Asanova – Candidate of Technical Sciences; Associate;
<https://orcid.org/0000-0003-3781-7017>,
natali_as@mail.ru

Научная статья
УДК 621.317.3/4
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-6>



Моделирование частотных свойств магнитоэлектрических структур

Алексей Валерьевич Метёлкин, Иван Андреевич Поликарпов✉
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация. Настоящее исследование посвящено исследованию частотных свойств магнитоэлектрических структур. Основная проблема, решаемая в ходе исследования, заключается в построении частотной модели прямого магнитоэлектрического эффекта на основе экспериментальных исследований, полученных для двухслойного композитного образца цирконат-титанат свинца – MetGlass в магнитном поле, созданном катушками Гельмгольца. Результатом исследования является обобщенная схема замещения двухслойных магнитоэлектрических структур и подход к методике расчета ее параметров. Полученные результаты могут быть использованы как при применении двухслойных структур в составе электротехнических устройств (фильтров, магнитоэлектрических трансформаторов), так и, в дальнейшем, при разработке новых видов композитных материалов.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, двухслойная структура, магнитное поле, катушка Гельмгольца, схема замещения, частотная характеристика, электрический фильтр

Для цитирования: Метёлкин А. В., Поликарпов И. А. Моделирование частотных свойств магнитоэлектрических структур // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 50–57. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-6>.

Original article

Frequency properties modeling of magnetoelectric structures

Aleksey V. Metelkin, Ivan A. Polikarpov✉
MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract. The paper examines the frequency properties of magnetoelectric structures. The main task of the work is the construction of a frequency model of the direct magnetoelectric effect. This model is based on the experimental research conducted on a two-layer composite sample of lead zirconate titanate (PZT) – MetGlass in a magnetic field created using Helmholtz coils. The study results are the creation of a generalized equivalent circuit of two-layer magnetoelectric structures and the development of a method for calculating its characteristics. The findings are applicable to the utilization of two-layer structures in the design of electrical devices (filters, magnetoelectric transformers) and, subsequently, to the creation of novel composite materials.

Keywords: magnetoelectric effect, two-layer structure, magnetic field, Helmholtz coil, equivalent circuit, frequency response, electronic filter

For citation: Metelkin A. V., Polikarpov I. A. Frequency properties modeling of magnetoelectric structures. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):50–57. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-6>.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий этап развития научно-технического прогресса в области электротехники связан с неуклонной миниатюризацией создаваемых устройств. Данное направление немислимо без разработки новых электро-

технических и конструкционных материалов. На данном этапе развития металлургии дальнейшая миниатюризация устройств на основе полупроводниковых материалов затруднена в связи с приближением к технологическому пределу [1], в связи с чем внимание как отече-

ственных, так и зарубежных исследователей привлекают методы нелинейного преобразования, основанные на не применимых ранее в интегральных сборках магнитоэлектрическом и электромагнитном эффектах – изменении электро- и магнитоэлектрических свойств материалов под действием дуального (магнитного или электростатического поля) [2]. Ряд работ, в частности [3], посвящен применению подобных материалов в микроэлектромеханических преобразователях (MEMS) за счет совместного использования магнитоэлектрического и прямого пьезоэффекта. Тем не менее возможное применение таких материалов значительно шире и их использование ограничено на настоящий момент недостаточной исследованностью конкретных композитов, что не позволяет построить достаточно полную математическую модель. Ряд исследований посвящен моделированию статических характеристик (взаимосвязи напряженностей полей) и показывает их нелинейность [4]. Данное исследование направлено в первую очередь на многослойные структуры, которые могут в первом приближении считаться нелинейными. Поскольку на настоящий момент композитные материалы находят свое применение в основном в электромеханике, большинство существующих исследований не рассматривает частотные свойства композитов, особенно в области высоких частот. В то же время значительный интерес представляет применение подобных материалов в электронных устройствах в качестве частотно-избирательных элементов. Это направление и является основной темой проводимого автором настоящей статьи исследования. Цель исследования заключается в разработке схемы замещения двухслойной (в первом приближении) композитной структуры, что позволит применять полученную модель в классических пакетах схемотехнического моделирования. В основе исследования во многом лежат материалы, полученные авторами исследования [5], рассматривающего эффект «дрейфа электростатического поля» на частотные характеристики трехслойной резонансной структуры, и рассмотренные в ис-

следовании [6] тепловые эффекты, вызывающие дрейф частотных характеристик за счет смещения частоты механического резонанса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования разработана лабораторная установка, общий вид и структурная схема которой показаны на рис. 1. Образец композитного материала, состоящий из пластины ЦТС, на которую наклеена полоса MetalGlass, помещена в магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца. С помощью лабораторного источника питания регулировалась частота тока через обмотки катушек. При этом значение индукции поддерживалось постоянным. Частота магнитного поля регулировалась с целью получения частотных характеристик – действующего напряжения на образце в зависимости от модулируемой частоты. Сформированная на этапе постановки задачи предварительная гипотеза – при продольном размещении композитного двухслойного материала – полосы MetalGlass на ЦТС относительно силовых линий создаваемого катушками магнитного поля частотная характеристика (рис. 2) в области высоких частот близка к характеристике параллельного резонансного контура (полосно-пропускающего фильтра), а при поперечном размещении – полосно-заграждающего фильтра (последовательного колебательного контура) – подтвердилась. Соответственно возникает основная гипотеза исследования – о возможности аппроксимации частотной характеристики с помощью суперпозиции линейных фильтров нижних и верхних частот [7]. Рассмотрение частотных характеристик в области низких частот не проводилось ввиду малой практической применимости – необходимости построения катушек Гельмгольца значительных габаритов для получения низкочастотных магнитных полей.

Аппроксимация в рамках проводимого исследования проводится с использованием приближения (1):

$$U(f) = \prod_{j=1}^k (f - f_j)^n \cdot \prod_{i=1}^l \frac{1}{(f - f_i)^m}, \quad (1)$$

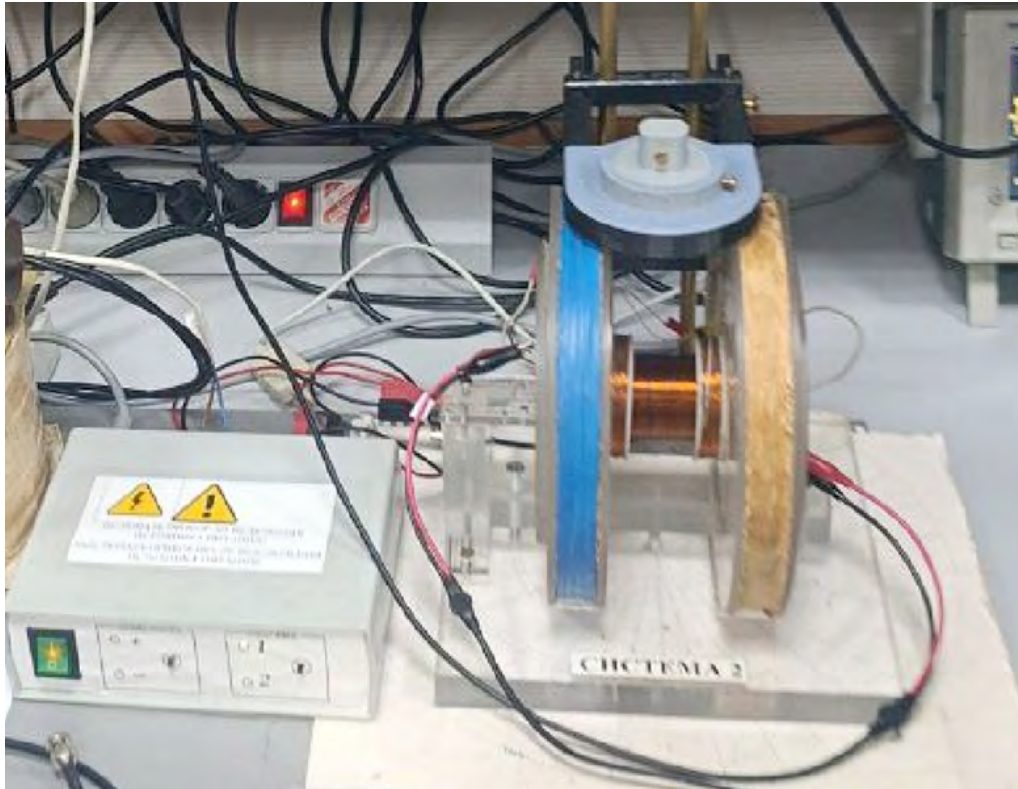


рис. 1 а) Общий вид установки



б) Структурная схема

Рис. 1. Внешний вид и структурная схема лабораторной установки

Примечание: разработано авторами в ходе подготовки экспериментальных исследований.

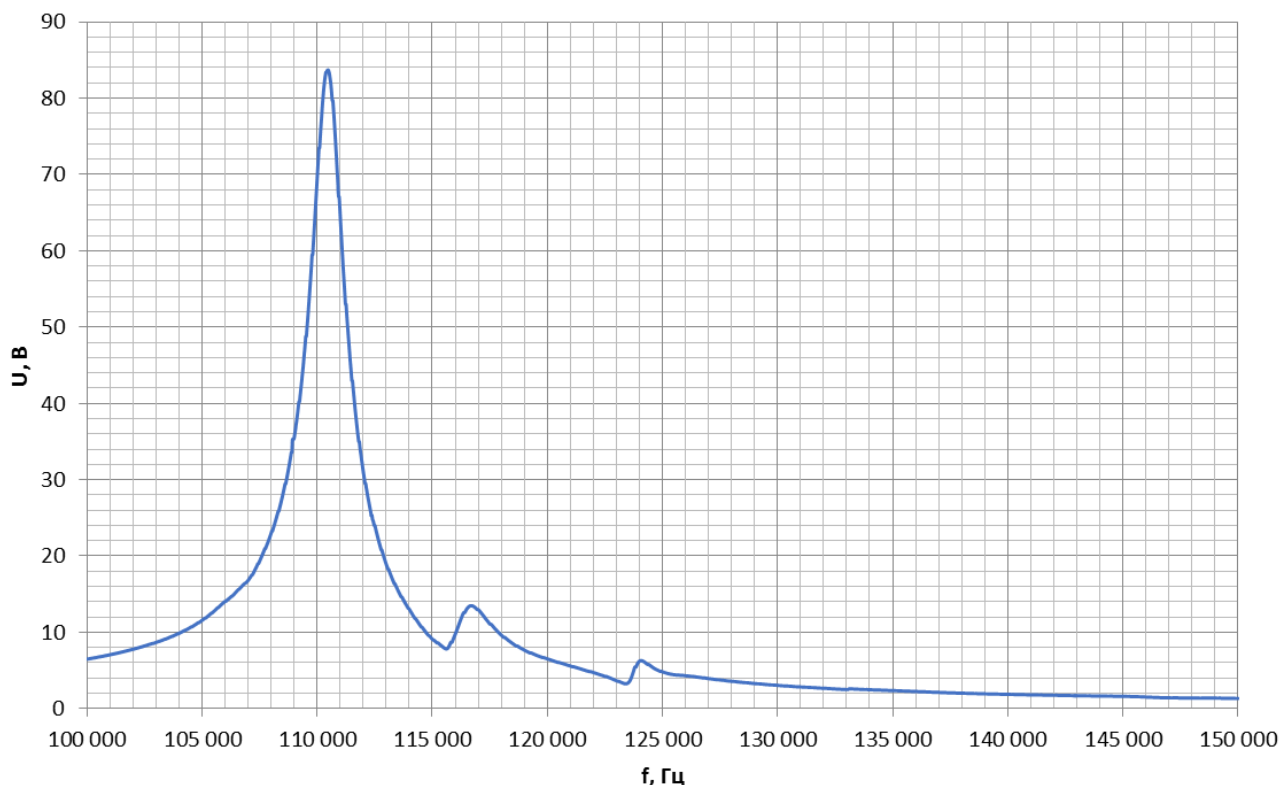


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика образца

Примечание: данные получены авторами на основе исследований экспериментального образца.

где k – количество звеньев фильтров верхних частот (ФВЧ);

l – количество звеньев фильтров нижних частот (ФНЧ);

n, m – порядок однотипных фильтров.

Для аппроксимации структуры в качестве $f_{i,j}$ принимаются значения экспериментальной АЧХ, причем локальные максимумы соответствуют ФНЧ, а минимумы – ФВЧ [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для аппроксимации характеристики, приведенной на рис. 2, использовался полином (1) пятого порядка. Расчетные минимумы наблюдались на частотах 115,7; 123,6 кГц, а максимумы – 110,455; 117,005 и 124,55 кГц соответственно. Таким образом, для аппроксимации применено три ФНЧ- и два ФВЧ-звена. Порядок фильтров n, m может быть выбран как эмпирически, так и с помощью аналитического соотношения при максимальной паре значений частот среза:

$$n = \frac{\lg|f_{\text{ФВЧ}} - f_{\text{ФНЧ}}|}{20}, \quad (2)$$

основанного на известном из теории сигналов факте, что увеличение порядка фильтра на единицу приводит к увеличению наклона логарифмической частотной характеристики на 20 децибел на декаду.

Также при аппроксимации двухслойной структуры необходимо стремиться к минимальному порядку звеньев фильтров, поскольку количество дифференциальных уравнений, составляемых для моделирования во временной и частотной области, прямо пропорционально порядку, в связи с чем с ростом порядка возрастает время и вычислительная сложность моделирования. Соответственно требуется достижение оптимума между точностью аппроксимации и сложностью модели. Для рассматриваемой структуры проведена аппроксимация фильтрами второго порядка, соответственно, для реализации модели достаточно системы из десяти дифференциальных уравнений. Точность аппроксимации при этом (рис. 3) достаточно высока – отклонение не превышает пяти процентов.

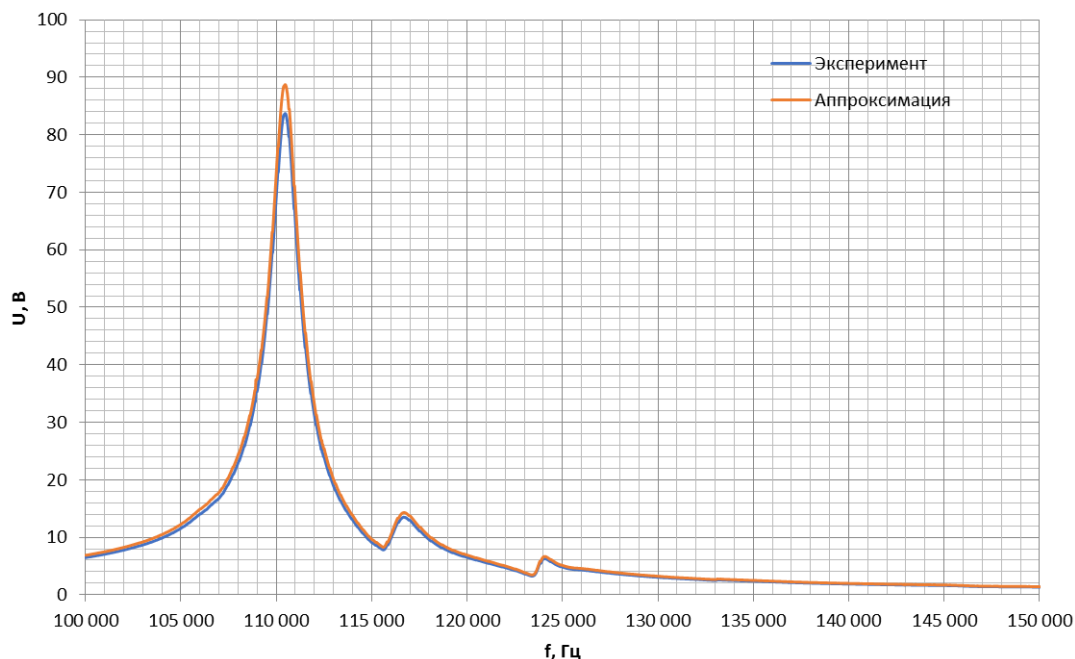


Рис. 3. Сопоставление экспериментальной и аппроксимированной характеристик

Примечание: составлено авторами на основании сопоставления данных, полученных в результате эксперимента и аналитической аппроксимации.

Большинство современных пакетов схемотехнического моделирования предусматривают ввод математической модели на основе электротехнической аналогии. В рамках поставленной при исследовании задачи каждое элементарное звено, состоящее из пары ФНЧ–ФВЧ, может быть представлено комбинацией RC-звеньев (рис. 4).

Так как первичное модельное напряжение формируется с помощью создаваемого током в катушке Гельмгольца магнитного поля, для проведения электротехнической аналогии введен источник напряжения, управляемый током. Для формирования частотной харак-

теристики использованы дифференцирующая $C_n R_n$ и интегрирующая $C_n R_n$ цепи. Для учета возможных нелинейностей статической характеристики в модель вводится нелинейное сопротивление, позволяющее получать нелинейную зависимость напряжения на обкладках композитного материала от индукции магнитного поля.

За счет применения управляемых током источников предложенная модель не требует принятия дополнительных мер по согласованию входного и выходного сопротивлений и может быть введена в качестве макроэлемента в пакеты схемотехнического моделирования [9].

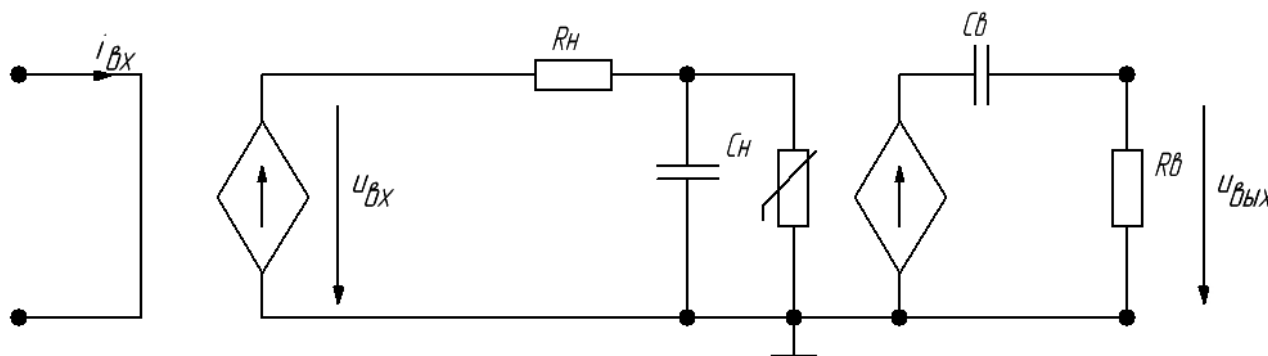


Рис. 4. Схема замещения элементарного звена фильтра

Примечание: получена авторами на основе полученного аналитического выражения (1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в настоящем исследовании синтез математической, а затем имитационной модели двухслойной структуры на основе экспериментальных частотных характеристик позволяет значительно расширить перспективы применения подобных композитных материалов в миниатюрных электротехнических и электронных устройствах. Так, по ряду показателей (значительное подавление побочных гармоник) структуры ЦТС–MetalGlass более перспективны для применения в качестве резонансных элементов вместо классических кварцевых резонаторов в фильтрах и времязадающих цепях. Препятствием для внедрения в этой роли на настоящий момент является отсутствие расчетных и проектных методик, позволяющих детерминированно разрабатывать конструкции с наперед заданными частотными свойствами.

Возможность преобразования электромагнитного поля в электростатическое позволяет использовать многослойные структуры в статических преобразователях – маломощных измерительных высокочастотных преобразователях. Наибольшее применение, на взгляд авторов, в данной задаче могут получить структуры с большим количеством слоев, в пределах – градиентные конструкции. Предложенная в настоящем исследовании методика синтеза схемы замещения может быть расширена и на градиентные структуры за счет перехода от модели многозвенного фильтра к модели фильтра на отрезках длинных линий с учетом возможных паразитных эффектов [10–12].

Разработанная имитационная модель в силу универсальности описания может при-

меняться для моделирования во всех вышеперечисленных областях. На настоящий момент подобный подход к магнитоэлектрическим композитам применен впервые. Некоторым недостатком проведенного исследования является отсутствие статистического анализа полученных результатов ввиду недостаточной на настоящем этапе выборки результатов эксперимента. В дальнейшем планируется проведение статистически значимой серии экспериментов с целью исследования, первичной гипотезой которого является вывод из результатов настоящей работы – двухслойные металлокерамические образцы могут быть аппроксимированы фильтрами первого порядка.

Диалектически проведенное исследование не только отвечает на ряд вопросов, но и задает ряд новых, представляющих собой направления дальнейших исследований:

- расширение функционала разработанной модели за счет учета возможного гистерезиса характеристик;
- установление взаимосвязи между конструктивными и частотными характеристиками образцов;
- проверка гипотезы о наличии «эффекта масштаба» – изменение пропорциональности магнитоэлектрического эффекта при пропорциональном изменении размеров образца;
- расширение полученных результатов на многослойные и градиентные композитные структуры;
- разработка методов синтеза конструкции магнитоэлектрических элементов по известным статическим и частотным характеристикам.

Список источников

1. Вольпяс О. В. Полупроводниковые материалы для создания перспективной компонентной базы и развития отечественной микроэлектроники: перовскиты // Open Science 2023 : сб. тезисов X Всероссийского молодежного научного форума с международным участием, 15–17 ноября 2023 г., г. Гатчина. Гатчина : Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, 2023. С. 176.
2. Юсупов Д. М., Амиров А. А. Магнитоэлектрический эффект в композитах из материала с эффектом памяти формы // Новые материалы: дизайн,

References

1. Volpyas O. V. Poluprovodnikovye materialy dlya sozdaniya perspektivnoy komponentnoy bazy i razvitiya otechestvennoy mikroelektroniki: perovskity. In: *Collection of Abstracts of the 10th All-Russian Youth Scientific Forum with International Participation "Open Science 2023"*, November 15–17, 2023, Gatchina. Gatchina: Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov; 2023, p. 176. (In Russ.).
2. Yusupov D. M., Amirov A. A. Magnitoelektricheskiy effect v kompozitakh iz materiala s effectom pamyati formy. In: Zagrebin M. A., ed. *Proceedings of the*

- синтез, функциональные свойства : сб. материалов научного семинара, 18–19 августа 2018 г., г. Челябинск. Челябинск : Челябинский государственный университет, 2018. С. 26.
- Звездин А. К., Воробьева Г. П., Кадомцева А. М. и др. Квадратичный магнитоэлектрический эффект и роль магнитокалорического эффекта в магнитоэлектрических свойствах мультиферроика BaMnF₄ // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2009. Т. 136, № 2. С. 265–271.
 - Маничева И. Н., Филиппов Д. А., Лалетин В. М. Магнитоэлектрический эффект в трехслойной структуре никель – кварц – никель // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 4 (82). С. 27–32. <http://doi.org/10.23670/IRJ.2019.82.4.005>.
 - Лалетин В. М., Филиппов Д. А. Влияние Delta E-эффекта на полевую зависимость магнитоэлектрического эффекта в области электромеханического резонанса // Журнал технической физики. 2018. Т. 88, № 2. С. 194–197. <http://doi.org/10.21883/JTF.2018.02.45406.2337>.
 - Болотина Е. В., Савельев Д. В., Турутин А. В. и др. Влияние температуры на магнитоэлектрический эффект в композитной гетероструктуре бидоменный ниобат/fecosib // Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех-2024) : Международная научно-техническая конференция, 02–08 декабря 2024 г., г. Москва. М. : МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. С. 542–545.
 - Смирнов А. В. Метод одновременной оптимизации характеристик электрических фильтров в частотной и временной областях // Российский технологический журнал, 2018. Т. 6, № 6. С. 13–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>.
 - Трифонов И. И., Скиба К. С. Аппроксимация амплитудно-частотных характеристик минимально-фазовых рекурсивных цифровых полосовых фильтров // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника, 2005. Т. 48, № 7. С. 11–17.
 - Прикота А. В., Бубнов В. В. Современные технологии моделирования электронных схем в системе схемотехнического моделирования SimOne // Наноиндустрия. 2019. № S89. С. 361–367. <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.361.367>.
 - Иванов Д. В., Кащуба О. А., Дубинин А. Е. Идентификация моделей длинных линий на основе адаптивных фильтров с разностями дробного порядка // Электротехника. 2017. № 3. С. 23–26.
 - Будко Д. А. Фильтры на поверхностных акустических волнах, датчики физических величин на их основе и меры малой длины (5 мкм), изготавливаемые ОАО НПП Эталон г. Омск // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. № 11. С. 44–45.
 - Унру Н. Э. Межрезонаторная связь в дискретно перестраиваемых фильтрах на отрезках однородных длинных линий // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 4. С. 60–63.
 - Scientific Seminar “Novye materialy: dizayn, sintez, funktsionalnye svoystva”, August 18–19, 2018, Chelyabinsk. Chelyabinsk: Chelyabinsk State University; 2018. p. 26. (In Russ.).
 - Zvezdin A. K., Vorobyova G. P., Kadomtseva A. M. et al. Quadratic magnetoelectric effect and the role of the magnetocaloric effect in the magnetoelectric properties of multiferroic BaMnF₄. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2009;136(2):265–271. (In Russ.).
 - Manicheva I. N., Filippov D. A., Laletin V. M. Magnetoelectric effect in a three layer nickel – quartz – nickel structure. *International Scientific Research Journal*. 2019;4–1(82):27–32. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.82.4.005>. (In Russ.).
 - Laletin V. M., Filippov D. A. The influence of the Delta E effect on the field dependence of the magnetoelectric effect in the region of electromechanical resonance. *Journal of Technical Physics*. 2018;88(2):194–197. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.02.45406.2337>. (In Russ.).
 - Bolotina E. V., Savelev D. V., Turutin A. V. et al. Influence of temperature on the magnetoelectric effect in the composite heterostructure of bidomain niobate/fecosib. In: *International Scientific and Technical Conference: “Optical technologies, materials and systems (Optotech-2024)”*, December 02–08, 2024, Moscow. Moscow: MIREA – Russian Technological University; 2024. p. 542–545. (In Russ.).
 - Smirnov A. V. Method of simultaneous optimization of radio devices performance in frequency and time domains. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal*. 2018;6(6):13–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>. (In Russ.).
 - Trifonov I. I., Skiba K. S. Approximation of amplitude-frequency responses of minimum-phase recursive digital band-pass filters. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika*. 2005;48(7):11–17. (In Russ.).
 - Prikota A. V., Bubnov V. V. Modern technologies in electronic circuit simulation released in SimOne circuit simulator. *Nanoindustria*. 2019;S(89):361–367. <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.361.367>. (In Russ.).
 - Ivanov D. V., Katsyuba O. A., Dubinin A. E. Identification of models of long lines on the basis of adaptive filters with a fractional-order differences. *Russian Electrical Engineering*. 2017;(3):23–26. (In Russ.).
 - Budko D. A. Filters on surface acoustic waves, sensors physical quantities on their base and measure of the small length (to 5 microns), made on “Plant Etalon” Omsk. *Industrial Automated Control Systems and Controllers*. 2010;(11):44–45. (In Russ.).
 - Unruh N. E. Interresonators circuit of coupling in discrete tuning filters on pieces of homogeneous long lines. *Voprosy radioelektroniki*. 2016;(4):60–63. (In Russ.).

Информация об авторах

А. В. Метёлкин – аспирант;
<https://orcid.org/0009-0008-6592-3806>,
almet20@mail.ru

И. А. Поликарпов – аспирант;
<https://orcid.org/0009-0001-6081-8571>,
nenchic756@yandex.ru✉

About the authors

A. V. Metelkin – Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0008-6592-3806>,
almet20@mail.ru

I. A. Polikarpov – Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0001-6081-8571>,
nenchic756@yandex.ru✉

Научная статья
УДК 004.934.056.5
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-7>



Комплексное решение многоуровневой стратегии защиты программных средств обработки акустической информации

Николай Евгеньевич Балакирев, Игорь Сергеевич Сергеев[✉], Кирилл Андреевич Коновалов
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Аннотация. В статье представлена многоуровневая стратегия защиты программных средств и обрабатываемых ими акустических данных, разработанная на примере комплексов «Голосовая почта» и «Акустический оптимизатор». В основе подхода лежит структурное преобразование звукового потока с потерями, не влияющими на его информационное содержание, что позволяет использовать компактную форму представления данных в качестве механизма сокрытия. Предлагаемая стратегия сочетает программные и аппаратные методы защиты, включая индивидуализацию экземпляров программ, обфускацию кода, внедрение внешних аппаратных модулей, а также формализацию процедур в виде операторной схемы. Реализация методов обеспечивает устойчивость программных решений к анализу, декомпиляции и подмене, а также повышает защищенность звуковой информации от несанкционированного доступа.

Ключевые слова: защита программных средств, структуризация, оптимизация, обфускация, сжатие с потерями, акустическая информация, цифровая обработка, кодирование данных

Для цитирования: Балакирев Н. Е., Сергеев И. С., Коновалов К. А. Комплексное решение многоуровневой стратегии защиты программных средств обработки акустической информации // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 58–72. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-7>.

Original article

Comprehensive approach to multi-layered protection strategy of acoustic information processing software

Nikolay E. Balakirev, Igor S. Sergeev[✉], Kirill A. Konovalov
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Abstract. The article presents a multi-layered protection strategy for software systems and the acoustic data they process, developed using the “Voicemail” and “Acoustic Optimizer” applications. The fundamental aspect of this methodology is a structural transformation applied to the audio stream, incorporating lossy compression to retain the original information, which in turn facilitates the utilization of a compact data representation for the purpose of concealment. The proposed strategy combines software and hardware protection methods, including program instance individualization, code obfuscation, integration of external hardware modules, and procedure formalization using an operator-based model. The implementation of these methods ensures the resilience of software solutions against analysis, reverse engineering, and tampering while also enhances the protection of acoustic data against unauthorized access.

Keywords: software protection, structuring, optimization, obfuscation, lossy compression, acoustic information, digital signal processing, data encoding

For citation: Balakirev N. E., Sergeev I. S., Konovalov K. A. Comprehensive approach to multi-layered protection strategy of acoustic information processing software. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):58–72. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-7>.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья посвящена разработке многоуровневой стратегии обеспечения стойкости программных средств и обрабатываемых ими данных к попыткам несанкционированного вскрытия.

Любые методы шифрования обладают конечным сроком устойчивости: при наличии достаточного времени и вычислительных ресурсов зашифрованные данные могут быть вскрыты. В классической работе Клода Шеннона “Communication Theory of Secrecy Systems” сформулировано, что единственно теоретически неразрушимым является шифр с равной длиной ключа и сообщения – например, одноразовый блокнот (one-time pad). Любой другой шифр при определенной вычислительной мощности и наличии ресурса времени может быть вскрыт [1].

В большинстве случаев шифрование предполагает применение операций по преобразованию или перемешиванию кодируемых символов с использованием ключей различной длины, при этом длина итогового потока данных остается, как правило, неизменной. Стойкость алгоритма в значительной степени зависит от длины ключа: чем он больше, тем больше времени требуется для его перебора и соответственно для вскрытия зашифрованной информации.

В рамках настоящего исследования под передаваемыми данными будут подразумеваться звуковые данные. Одним из потенциальных способов обеспечения их защиты является применение алгоритмов сжатия с потерями, как, например, те, что используются в форматах MP3 или AAC [2]. Однако широкое распространение и высокая известность математических преобразований, лежащих в основе таких методов (в частности, преобразования Фурье), ограничивают их применение в задачах защиты данных.

Предлагаемый в статье подход основан на структурном представлении звукового потока во временной области с потерями промежуточных значений амплитуды, не влияющими на восприятие сигнала и не нарушающими его информационного содержания [3]. Та-

кое представление обеспечивает компактную форму хранения и передачи акустической информации (в дальнейшем – КоФ).

Не имея информации о структуре КоФ и способах ее декодирования, злоумышленник оказывается неспособным преобразовать данные в исходный звуковой поток. Таким образом, защита обеспечивается не только за счет сжатия, но и за счет сложности самой процедуры восстановления, зависящей от реализованных программных алгоритмов и структуры представления данных.

Фактически ключом к расшифровке информации, преобразованной в КоФ, является либо наличие исходного кода программных средств, реализующих все этапы преобразования и восстановления, либо знание алгоритмических принципов, лежащих в основе процессов структуризации, уплотнения и кодирования звуковой информации. В первом случае злоумышленник получает доступ к исходному коду программного продукта, во втором – осуществляет «реверс-инжиниринг», создавая функциональный аналог с использованием иного кода, но с сохранением логики обработки данных.

Процедура вскрытия требует значительных усилий, специальных инструментов и квалификации, что существенно повышает порог для потенциального нарушителя и увеличивает временные затраты на анализ. В этом случае можно утверждать, что длиной ключа будет длина реализованного алгоритма, помноженная на сложность алгоритма КоФ. Логично предполагать, что время вскрытия такой программы злоумышленником будет на порядок больше, чем вскрытие ключа шифрования. Из этого следует, что первоочередной задачей является обеспечение защищенности самой программы от кражи, модификации и анализа – всеми возможными средствами. Отсюда следует, что приоритетной задачей становится защита самой программной реализации от несанкционированного копирования, анализа и модификации с использованием как существующего набора средств защиты, так и разработкой собственных инструментов в рамках многоуровневой стратегии защиты.

В рамках проводимых исследований, направленных на анализ и синтез информационного содержания акустических сигналов [4], был также получен прикладной результат в виде значительного сокращения объема передаваемых данных. Это стало возможным за счет структуризации звукового потока на основе амплитудных характеристик с минимальными потерями, не влияющими на восприятие сигнала. Как показано в работе [3], восстановление звукового потока из структурированной формы обеспечивает полное сохранение информационного содержания. Таким образом, наряду с задачами оптимизации объема данных предлагаемые преобразования могут рассматриваться как эффективный механизм скрытой передачи информации, аналогичный криптографическим подходам.

Дальнейшие разделы статьи посвящены вопросам реализации многоуровневой защиты данных и программных решений, а также анализу применяемых инструментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С учетом сложности реализуемой многоуровневой стратегии защиты программных средств и генерируемых данных представляется целесообразным описывать весь процесс в рамках формализованной операторной модели. В данной модели каждый этап обработки данных рассматривается как функция, допускающая множество возможных реализаций, которые далее будут обозначаться как оператор-процедуры. Предполагается, что к одному и тому же набору данных может быть применен единый алгоритм преобразования, реализованный в различных вариантах, приводящих к идентичному результату.

Для дальнейшего построения операторной схемы передачи и хранения данных введем используемые обозначения.

Служебные символы и их назначение:

(...) – в круглых скобках будет указываться множество элементов, на которое распространяется алгоритм защиты данных;

[...] – в квадратных скобках будет указываться множество элементов, на которое рас-

пространяется стратегия (процедура) защиты алгоритма;

– логическое объединение (связывание) процедур в рамках выбранной стратегии;

\Rightarrow – символ преобразования одной последовательности данных в другую последовательность.

Обозначения данных:

a_i – исходный элемент потока данных волнового явления,

где $a_i \in A = (a_1, a_2, \dots, a_p, \dots, a_n, \dots)$;

a_{i^c} – закодированный элемент последовательности данных, где $a_{i^c} \in A^c = (a_{1^c}, a_{2^c}, \dots, a_{i^c}, \dots, a_{n^c}, \dots)$ без изменений их объема относительно исходного потока;

S_j – последовательность, где $S_j \in S$, т. е. $(S_1, S_2, \dots, S_p, \dots, S_k, \dots)$, элемент структурированного потока данных, полученного из потока $(a_1, a_2, \dots, a_p, \dots, a_n, \dots)$, и при этом $k < n$;

g_i – последовательность, где $g_i \in G$, т. е. $(g_1, g_2, \dots, g_p, \dots, g_n, \dots)$, элемент упакованных (оптимизированных) данных относительно исходного потока звуковых данных;

u_{i^c} – последовательность, где $u_{i^c} \in U^c$, т. е. $(u_{1^c}, u_{2^c}, \dots, u_{i^c}, \dots, u_{k^c}, \dots)$, элемент оптимизированных данных относительно структурированного потока данных;

$a_{i^c} \in A^c = (a_{1^c}, a_{2^c}, \dots, a_{i^c}, \dots, a_{n^c}, \dots)$ без изменений их объема относительно исходного потока.

Обозначения общих функций-алгоритмов:

F – функция-алгоритм прямого однозначного отображения или преобразования одной последовательности данных в другую последовательность;

V – функция-алгоритм обратного однозначного отображения или преобразования одной последовательности данных в другую последовательность относительно прямой функции-алгоритма;

R_j^j – j -я реализация функции-алгоритма прямого однозначного отображения или преобразования одной последовательности данных в другую последовательность;

R_i^j – j -я реализация функции-алгоритма обратного однозначного отображения или преобразования одной последовательности данных в другую последовательность.

Тогда общепринятое преобразование при кодировании данных может быть представлено как:

$$F(a_1, a_2, \dots, a_p, \dots, a_n, \dots) \Rightarrow (a_{1^c}, a_{2^c}, \dots, a_{i^c}, \dots, a_{n^c}, \dots), \quad (1)$$

А обратная функция будет выглядеть следующим образом:

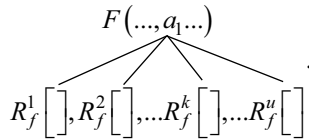
$$V(a_{1^c}, a_{2^c}, \dots, a_{i^c}, \dots, a_{n^c}, \dots) \Rightarrow (a_1, a_2, \dots, a_p, \dots, a_n, \dots). \quad (2)$$

Тогда общая схема преобразований при обмене передающей и принимающей сторон будет следующей:

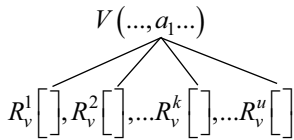
$$\begin{aligned} F(a_1, a_2, \dots, a_p, \dots, a_n, \dots) &\Rightarrow (a_{1^c}, a_{2^c}, \dots, a_{i^c}, \dots, a_{n^c}, \dots), \\ V(a_{1^c}, a_{2^c}, \dots, a_{i^c}, \dots, a_{n^c}, \dots) &\Rightarrow (a_1, a_2, \dots, a_p, \dots, a_n, \dots). \end{aligned}$$

Обозначения общих операторов-процедур, реализующих алгоритмы кодирования:

Представление алгоритмов кодирования данных будет выглядеть следующим образом:



Аналогичная ситуация для обратной функции:



Как правило, для обычного кодирования процедура соответствует единственному экземпляру реализации:

$$R_f \equiv F \text{ и } R_v \equiv V.$$

В качестве таковой используется любой алгоритм кодирования без потерь. Далее рассматриваются только алгоритмы уплотнения (в том числе и кодирования) информации с потерями.

Обозначения конкретных операторов-процедур, реализующих алгоритм, обеспечивающий кодирование:

C_f^k – k -я процедура реализации прямой функции-алгоритма структуризации

$$C(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n, \dots) \Rightarrow (S_{1^c}, S_{2^c}, \dots, S_{i^c}, \dots, S_{k^c}, \dots),$$

где $k < n$, (3)

D_v^k – k -я процедура реализации обратной функции-алгоритма деструктуризации (восстановления из структурного представления):

$$D(S_{1^c}, S_{2^c}, \dots, S_{i^c}, \dots, S_{k^c}, \dots) \Rightarrow (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n, \dots),$$

где $k < n$, (4)

Q_f^k – k -я процедура реализации прямой функции-алгоритма фрагментного уплотнения структурного представления.

G_v^k – k -я процедура реализации обратной функции-алгоритма фрагментного восстановления структурного представления.

Тогда алгоритмы для прямого преобразования будут следующего вида:

$$Q(S_{1^c}, S_{2^c}, \dots, S_{i^c}, \dots, S_{k^c}, \dots) \Rightarrow (u_{1^c}, u_{2^c}, \dots, u_{i^c}, \dots, u_{k^c}, \dots),$$

где $k < n$, (5)

Тогда алгоритмы для обратного преобразования будут следующего вида:

$$G(u_{1^c}, u_{2^c}, \dots, u_{i^c}, \dots, u_{k^c}, \dots) \Rightarrow (S_{1^c}, S_{2^c}, \dots, S_{i^c}, \dots, S_{k^c}, \dots),$$

где $k < n$, (6)

H_f^k – k -я процедура реализации прямой функции-алгоритма уплотнения фрагментов на основе информационного содержания.

M_v^k – k -я процедура реализации обратной функции-алгоритма восстановления фрагментов на основе информационного содержания.

Z – общая многоуровневая стратегия защиты процесса передачи и хранения звуковых данных с указанием цепочки вариантов реализации процедур, включая в себя и мероприятия организационного характера.

Тогда операторная схема-модель организации защиты относительно данных будет выглядеть следующим образом.

Операторная схема 1:

$$Z \Rightarrow H(Q(C(\dots \theta_i, \dots))). \quad (7)$$

Операторная схема 1 применяется в случае применения фиксированной стратегии защиты данных. Такая стратегия соответствует постоянной стратегии защиты и может быть использована для не критичных обменов информацией.

Операторная схема 2:

$$Z^m \Rightarrow H^m(Q^m(C^m(\dots o_i, \dots))) \quad (8)$$

Операторная схема 2 применяется в случае порядковой стратегии защиты данных.

В данном случае возможно для каждой организации предоставить собственную стратегию защиты, что обеспечивает защищенность при раскрытии одной из стратегий.

Операторная схема 3:

$$Z^{k,m,n} \Rightarrow H^k(Q^m(C^n(\dots a_i, \dots))) \quad (9)$$

Операторная схема 3 применяется в случае применения переборной стратегии защиты дан-

ных. Такая схема предполагает динамический характер изменения используемых операторов. Таким образом, один и тот же результат возможно получить разными стратегиями, которые применимы как для оптимизации данных, так и для их защиты в соответствии с таблицей.

Симметричные процессы защиты можно использовать при восстановлении исходной информации с таким же набором стратегий. Стратегии приема и передачи должны быть синхронизированы в соответствии с совместимостью прямой и обратной процедурой. Количество стратегий определяется суммой вариаций для соответствующих процедур:

Таблица

Стратегии защиты данных

	C_1	...	C_k	Q_l	...	Q_m	H_1	...	H_n
Z_1	+					+	+		
Z_2		+		+					+
...									
Z_u	+			+		+			

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

$$C_u = k = m = n. \quad (10)$$

Например, при $k = m = n = 3 \Rightarrow 27$ вариантов стратегий. Предполагаемая согласованность процедур обеспечивает дополнительную защиту данных и процедур. Эффект можно усилить при распределении процедур по нескольким исполнителям (процессорам), дополняя стратегию различными маршрутами преобразования.

Более сложная процедура реализуется для защиты программной реализации алгоритмов, в которой присутствуют как программно-аппаратные методы, так и организационные мероприятия.

Точно так же допустимо защитить программный продукт в виде использования в динамике той или иной процедуры защиты самой программы. Указанная возможность представлена формулой (11):

$$Z \Rightarrow [H] \# [Q] \# [C], \quad (11)$$

что представляет собой логическое объединение защищенных процедур. Для этого возможно использование обфускации, индивиду-

ализации экземпляров программы. Возможно применение любого из вышеперечисленных способов в единственном варианте и для ограниченного перечня процедур.

В конечном счете можно обеспечить комплексную защиту как данных, так и процедур в зависимости от уровня угроз и важности информации в соответствии с формулой (12):

$$Z_j \Rightarrow \left\{ [H^k] \left[[Q^m] \left[[C^n] (\dots a_i, \dots) \right] \right] \right\}. \quad (12)$$

Далее будет рассмотрен каждый из вариантов защиты относительно данных и программного кода.

Защита звуковых данных, полученных при структуризации

Реализуя программные продукты по передаче речевых сообщений и компактному хранению звуковых данных с потерями (например, MP3 и AAC), в общепринятом варианте очень часто используют преобразование Фурье и вейвлет-преобразования, которые широко известны и не представляют какой-либо дополнительной сложности для воспроизведе-

дения злоумышленниками в процессе обратного преобразования [5].

Предлагаемый подход представления звуковых данных основан на процессе структуризации звукового потока [4], где также происходит частичная потеря данных, но она предполагает утрату лишь той части информации, которая может быть восстановлена в пределах коридора из возможной вариации, таким образом, исключая потерю качества воспроизведения. Информация о процессе структуризации и кодировании звуковых данных не является общедоступной, в связи с чем появляется вопрос о защите генерируемых данных на основе структуризации.

Следует отметить, что программные средства «Голосовая почта» и «Акустический оптимизатор», используя структуризацию, реализованы на основе качественного подхода с использованием системы отношений для структурного представления звукового потока с возможностью сохранения его информационного содержания [3]. При данном подходе основными этапами обработки звукового потока стали выделение характерных элементов (характерных точек), структуризация (реализуемая операторами-процедурами C и D, формула (3), основанная на установлении отношений между характерными элементами [3, 4].

Как видно из предлагаемой выше модели защиты, в рамках обозначенной проблемы передачу звуковых сообщений, т.е. данных, можно осуществлять вне рамок стандартных общеупотребимых механизмов, например, таких как сквозное шифрование, которое можно осуществить через стандартизированные подходы [6–8], с использованием в особой оптимизированной и уплотненной форме [9].

На примере программных средств для работы со звуковыми данными предлагается сценарий преобразования согласно формуле (7) для исходного звукового потока, призванный затруднить действия злоумышленника. Мероприятиями в реализации вышесказанного используются несколько собственных разработок [9–11] и ряд общепринятых и специализированных решений [12–16].

Защита данных при оптимизации представления структуры

В структурном представлении звукового потока, при наличии общей формы представления структуры, все поля имеют максимальные размеры с учетом возможного разброса значений этих полей. Однако при внимательном рассмотрении оказывается, что достаточно большие участки звуковых данных не выходят за границы очень узкого диапазона значений. В рамках отсутствия речевых данных разброс значений может находиться в пределах 1–2 разрядов, тогда как под значение амплитуды выделяется 8 (или даже 16, 24) разрядов. Фиксация в двух разрядных полях сразу дает возможность уменьшить объем данных в 4 раза. Безусловно, это предполагает достаточно большой объем таких данных, что как раз и подтверждается на практике [11].

Более того, получение характеристик относительно фиксированных структур позволяет не только характеризовать их при разделении на классы различных участков, но и предложить их автоматическое объединение в так называемые совокупные фрагменты по значению разброса между минимальным и максимальным значением с кратностью 2^n . При этом можно задать сразу несколько таких параметров, которые для удобства в дальнейшем именуется «калибрами». Тогда весь поток можно разбить на совокупные фрагменты со своим значением параметра калибра и далее при наличии достаточно большого такого фрагмента, представить его в оптимальном представлении, экономя число используемых разрядов. Безусловно, требуются дополнительные описатели, хотя бы для указания способа преобразования от обычной структуры к оптимальной для совокупного фрагмента. Но такие дополнительные издержки существенно малы по отношению к экономии представления структур в оптимальной форме. Такое преобразование мы именуем оптимизацией представления количественных значений, которое применимо и к другим полям исходной структуры.

Структурой называется модель данных, которая описывает характер поведения конфигурации или формы данных на основе некото-

рого множества устойчивых по содержанию элементов. Защитой же в случае с используемой звуковой информацией является использование КоФ, как было упомянуто ранее, со способом реализации этой КоФ, который не является общеизвестным.

Формальный способ такого представления соответствует схемам-формулам (3) и (4).

С помощью такого способа представления данных становится возможным, в том числе, реализация преобразованного варианта представления, названного уплотнением, что представлено ранее в рамках оператора-процедуры Q и G . Кроме того, также становится доступным еще один вариант преобразования, названный оптимизация, в рамках которого форма представления информации основывается на упомянутых характерных элементах – характерных точках, или паттернах, названных универсальный примитив (УНИПРИМ) [3]. Благодаря такому представлению информации становится реализуемым способ описания всех передаваемых звуковых данных через множество УНИПРИМов.

Защита данных через процесс совокупной фрагментации

В предложенном выше варианте использования характеристик при оптимизации выделялась количественная характеристика, указывающая на разброс значений в выделенных полях. Но по совокупности характеристик можно характеризовать и информационное содержание потока данных, которое, безусловно, является назначаемым субъектом-экспериментатором [4]. Однако при установлении параметров, которые могут быть объединением определенного набора характеристик, становится возможным автоматически назначать информационное содержание. При наличии обратной процедуры получения совокупного звукового фрагмента в соответствии с параметрами открывается перспектива восстановления речевых единиц. Тогда кодом, раскрывающим конкретное информационное содержание, будет соответствующий набор параметров. Ключом к вскрытию речи в таком случае будет программа, восстанавливающая речевые единицы. При абсолютно адекватном распознава-

нии речевых единиц возможно также их хранение в символьной форме.

В данный момент используется вариант с выделением совокупных фрагментов с так называемым минимальным информационным содержанием. То есть при наличии достаточно больших участков звуковой записи, когда ничего не произносится, а также когда присутствует пауза или промежуток между словами, их можно заменить любой последовательностью значений амплитуд в заданном диапазоне значений. Все это никак не повлияет на то содержание, которое присутствует в речи.

Указанные участки можно маркировать короткой записью, которая в какой-то мере является кодом маркируемого фрагмента.

Таким образом, в соответствии с предложенной схемой будет оптимизирован как объем данных, так и в то же время закодирована речевая информация.

Описанные методы защиты звуковых данных реализуются в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

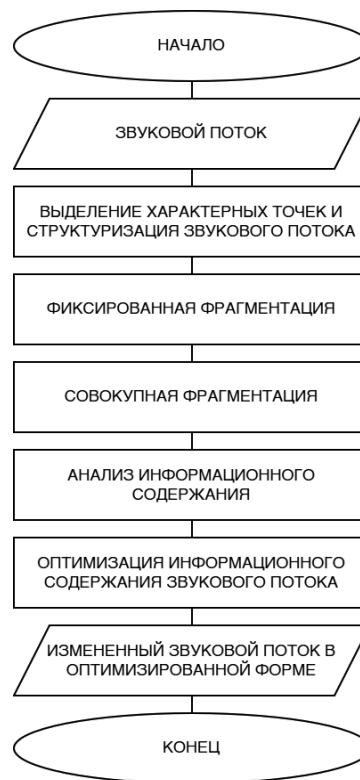


Рис. 1. Схема обработки звукового потока в рамках качественного подхода

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Защита данных через обфускацию программного кода

Как следует из предыдущего раздела защиты данных, можно понять, что не менее важным моментом при таком обеспечении является защита и программных процедур.

Программные средства «Голосовая почта» и «Акустический оптимизатор», как уже было сказано ранее, реализованы как прикладное программное обеспечение для операционных систем стационарных компьютеров и предоставляются в виде исполняемого файла и нескольких файлов подключаемых библиотек.

Современные платформы разработки, такие как .NET и JVM, предполагают использование байт-кода, который легче поддается анализу и дизассемблированию. Это повышает риск раскрытия логики работы программ,

особенно с применением инструментов типа IDA, что требует дополнительных мер по защите исходного кода.

Обфускация применяется для затруднения анализа исходного кода программ, особенно при использовании платформ .NET и JVM, где байт-код легко поддается декомпиляции. Основные приемы включают переименование функций и переменных, добавление «мусорных» конструкций, усложнение арифметики, маскирование литералов и строк. Эти меры усложняют понимание логики без изменения функциональности.

На примере программного средства «Акустический оптимизатор» проведена обфускация экземпляра программного средства, используя инструмент обфускации для .NET [17]. Фрагмент кода после обфускации представлен ниже на рис. 2.

```
// CompressionTool, Version=1.0.0.0, Culture=neutral, PublicKeyToken=null
// <PrivateImplementationDetails>{302B7DB6-35E9-4728-A0ED-6F35C076BEA6}.A7D8999C-9C76-4AEB-837A-B923EA1AFBF9
using ...

[StructLayout(LayoutKind.Auto, CharSet = CharSet.Auto)]
internal class A7D8999C-9C76-4AEB-837A-B923EA1AFBF9
{
    [StructLayout(LayoutKind.Explicit, Pack = 1, Size = 17024)]
    private struct 2
    {
        internal static 2 3/* Not supported: data(E E D9 C9 D3 C3 C4 E9 C1 C7 CE C5 CF D2 87 DF 85 FB DF DC CB DB CC CF 9D 8F 93
        66 F7 0E 7B 0C 6D 02 6A 00 6A 07 5C F4 04 AB FA AA F8 AE FE AF FD 98 F2 A2 F0 A5 F6 A4 05 12 11 16 4C 50 56 15 41 18 1D
        DC 89 EE 8F E5 8D E9 82 DB 71 7E 7D 7A 7F 83 D7 82 87 84 7F 1B 7D 10 72 23 71 1C 77 1A 75 08 6A 33 69 08 9F 6D 39 62 03
        08 67 0E 6D 0C 68 02 67 00 64 06 6A 04 6B 0A FA AB F8 AF FF 93 FD 97 F2 A8 F1 9B F7 9A 0B 1A EB 98 E9 8E EF 88 ED 8E E3
        88 E9 64 7F 31 3C 39 36 13 3E 3B 31 26 34 84 C8 C7 C4 C8 DD CD 7D 06 73 10 71 1F 77 1F 74 31 9B 69 38 6E 01 6C 0F 62 0D
        64 09 6B 0E 5E 0D 68 03 68 F1 06 68 04 6B 0A FB 92 F9 9E FF 97 FD 9A F3 91 F0 A6 F6 A7 1F 57 5A 53 5C 7A 4D 5D 47 5F 58
        |
        internal static byte[] 4 = new byte[17024];
        internal static string[] 5 = new string[419];
        private static string 6(int P_0, int P_1, int P_2)
        {
        }
        public static string A()
        {
            return 5[0] ?? 6(0, 0, 13);
        }
        public static string a()
        {
        }
        public static string B()
    }
}
```

Рис. 2. Фрагмент текста программы «Акустический оптимизатор» после применения обфускации

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Следует учитывать минусы обфускации, такие как увеличение времени на выполнение кода или увеличение размера исполняемого файла.

Защита данных через индивидуализацию экземпляров программы

Ключевым механизмом стратегии защиты, вокруг которого реализуются остальные, яв-

ляется индивидуализация экземпляров программного средства [10]. Данный механизм предлагается для организации взаимодействия участников обмена информации в рамках указанных программных средств таким образом, чтобы охватить задачи по своей реализации за счет механизмов использования различающихся вариантов кода программы

и структур передаваемой информации и их периодического изменения. Или, другими словами, механизм создания уникального экземпляра программного средства под каждого пользователя.

Теперь сформулируем требования к организации создаваемых программных средств через введенные ранее понятия:

предлагается распределение механизма защиты на всем пути работы с информацией;

вводится механизм контроля программного средства через его индивидуализацию.

Модель программного средства «Голосовая почта» показана на рис. 3.

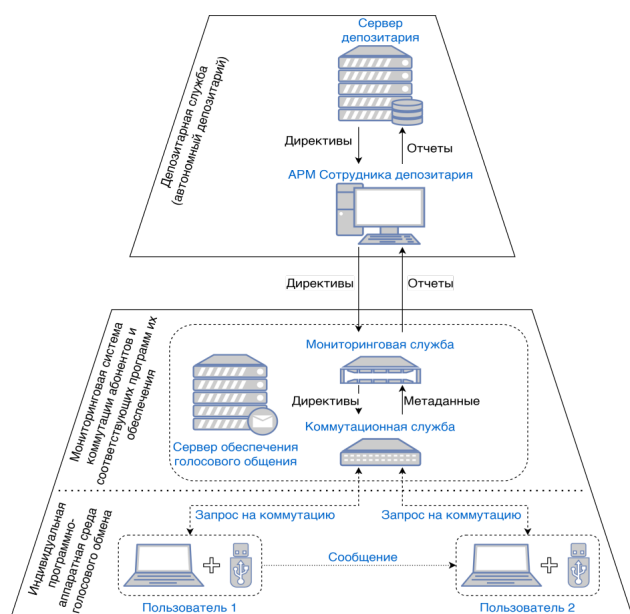


Рис. 3. Модель программного средства «Голосовая почта»

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Определим основные используемые далее понятия:

1) время вскрытия (T_B от «time»), характеризующее временной интервал, требуемый для вскрытия информации;

2) ресурсы злоумышленника (R_3 от «resources»), характеризующее программные и аппаратные возможности, требуемые для вскрытия информации;

3) квалификация злоумышленника (S_3 от «skill»), определяющее его уровень компетенций, знаний, умений.

Чтобы программное средство можно было охарактеризовать как защищенное, следует реализовать ее таким образом, чтобы:

1) время вскрытия было больше времени существования конкретного защитного механизма ($T_B > T_3$);

2) ресурсы злоумышленника были меньше ресурсов, требуемых для вскрытия ($R_B > R_3$);

3) квалификация злоумышленника оказалась меньшей требуемой для вскрытия ($S_B < S_3$).

Поскольку злоумышленник ставит своей целью получение информации из локальных данных работающего программного обеспечения или передаваемого потока, он анализирует, как уже было сказано ранее, входные и выходные данные какого-то программного обеспечения или какие-то компоненты программно-аппаратного решения, если смог получить к нему физический доступ. Чтобы усложнить злоумышленнику указанные действия, далее будут описаны предлагаемые способы программной и физической защиты.

Чтобы механизм индивидуализации мог работать, был также введен механизм учета и контроля как набор дополнительных действий (формула (12)). Данные механизмы помогают значительно увеличить требуемое для вскрытия время со стороны злоумышленника, т.е. параметр T_B . Благодаря этому механизму стало возможным контролировать сменяемость версий программного средства при функциональном обновлении, что регулирует временные интервалы актуальности конкретного варианта защиты.

После безуспешной попытки вскрытия информации будет попытка обратиться к алгоритмам программных средств. Меры, принятые на этом этапе, характеризуются усложнением анализа кода за счет следующих действий:

1) использование ассемблера при написании ключевых частей для минимизации повторяющихся участков кода;

2) создание индивидуальных версий, меняя части кода, не влияя на функционал, с применением внешнего аппаратного модуля (аппаратного ключа защиты);

3) ввод контроля использования индивидуальных версий;

4) применение обфускации кода индивидуальных версий, о чем будет дополнительно сказано далее.

Данный комплекс мер реализует:

1) вариабельность кода через индивидуализацию, в том числе перенося часть кода на внешний аппаратный модуль (увеличивая параметр R_B);

2) индивидуализацию структур пакета через внешний аппаратный модуль, без изменения функциональности (увеличивая параметр S_B);

3) возможность периодического изменения кода и структур (увеличивая параметр T_B).

Добавляемый внешний аппаратный модуль призван обеспечить вынесение критич-

ного функционала с целью снижения влияния на рабочий процесс со стороны основного компьютера, когда подвергнуться воздействию могут рабочие процессы и данные в оперативной памяти. Процесс и обрабатываемые в этом процессе данные, находящиеся во внешнем аппаратном модуле, не видны для основной работающей системы, поэтому находятся в большей сохранности. С другой стороны, просто украв и использовав у себя, злоумышленник не сможет получить доступ к содержимому внешнего аппаратного модуля, т.к. имеется контроль его запуска на компьютерах, т.е. на неразрешенном он не запустится. Для наглядности индивидуализация с применением внешнего аппаратного модуля показана на рис. 4.

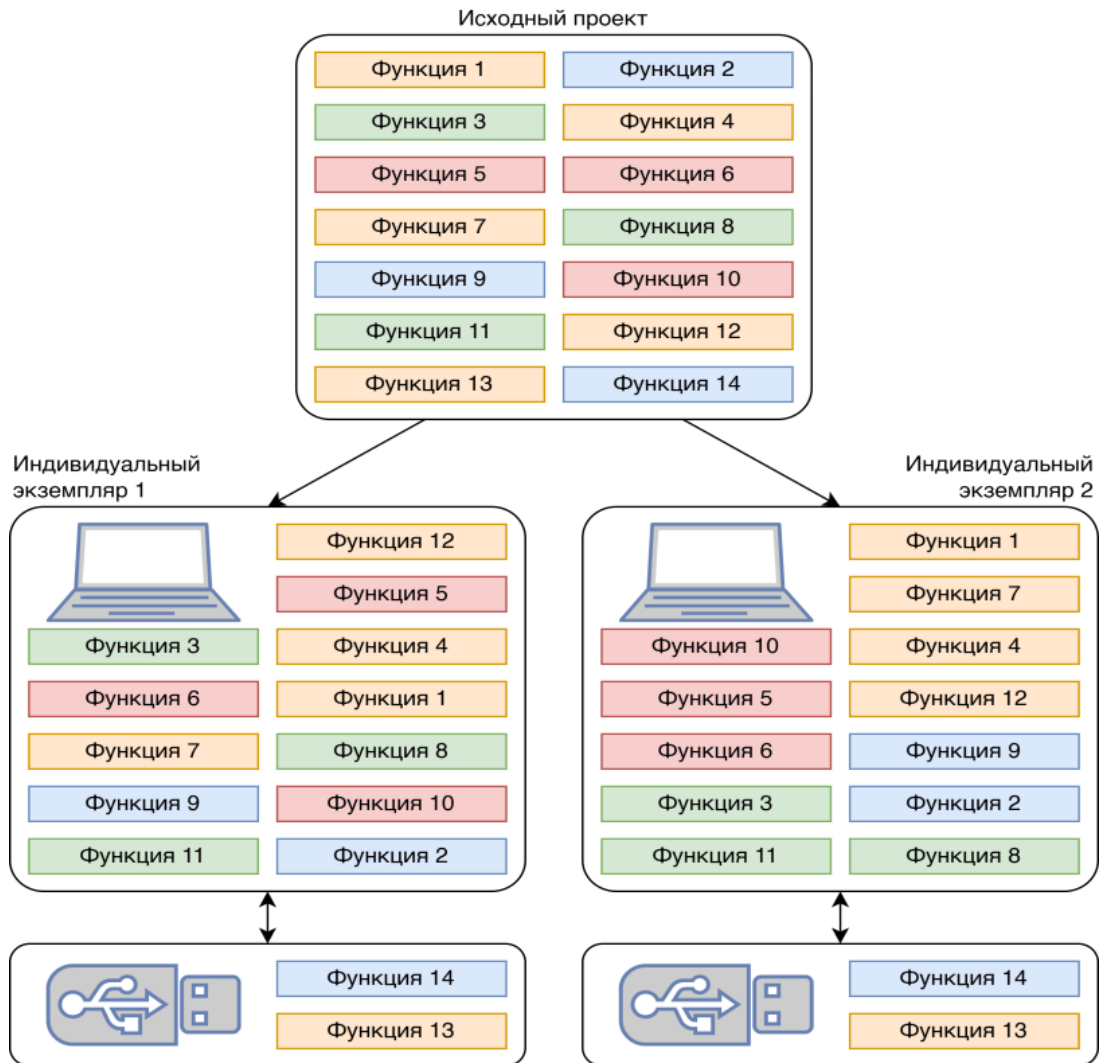


Рис. 4. Модель организации вариабельности кода и индивидуализации структур экземпляров программ
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Таким образом, достигаемые цели от введения индивидуализации с применением внешнего аппаратного модуля: бесполезность использования результатов вскрытия алгоритмов программного средства, т.к. к завершению вскрытия код программного средства уже может быть изменен. При этом периодичность изменения индивидуальных экземпляров программного средства предлагается отработать имитацией действий злоумышленника, осуществляя сменяемость в рамках правил выбранной политики, т.е. опытным путем корректируя T_B через T_{3M} (моделируемый T_3).

Организационное обеспечение защиты

Организационная составляющая стратегии защиты направлена на повышение безопасности программных средств за счет индивидуализации экземпляров и использования внешнего аппаратного модуля. В рамках предложенного подхода часть алгоритмов переносится во внешний модуль, что снижает риск копирования, анализа и модификации программного кода на целевом устройстве.

В качестве внешнего модуля используется Guardant Code от ООО «ГК-АКТИВ» [17], позволяющий разместить уникальный код обработки звукового потока вне исполняемого файла рис. 4. Потеря или компрометация модуля делает невозможным доступ к критическим частям кода.

Программный код записывается в виде прошивки, недоступной для чтения стандартными средствами [18]. Экземпляр программы функционирует только при наличии корректного аппаратного модуля, с которым ведется постоянный обмен. При извлечении устройства исполнение прекращается. Таким образом, копирование экземпляра без соответствующего модуля бессмысленно.

Из-за ограничений модуля используется компактная реализация функций, обрабатывающих переданные данные и возвращающих результат. Для повышения надежности введена проверка UID, что позволяет различать «правильные» и «неправильные» сценарии работы рис. 5, не уведомляя пользователя напрямую. Это затрудняет несанкциониро-

ванное применение программного средства даже при попытке подмены.

Особенностью предлагаемого способа является хранение UID на внешнем аппаратном модуле, по которому можно идентифицировать экземпляр программного средства и обеспечить в рамках алгоритма работы «правильное» или «неправильное» выполнение этапа структуризации, от которого зависят последующие этапы сжатия и восстановления звуковых файлов.

При стандартном «правильном» сценарии выполнения происходит:

- оптимизация объема на хранение значений амплитуд без изменений;
- аппроксимация значений амплитуд на фрагментах минимального информационного содержания к исходным значениям;
- выполнение алгоритмов оптимального кодирования без изменений.

Все эти действия позволяют уплотнить и восстановить звуковой файл, не потеряв качество сообщений, однако в случае несанкционированного использования индивидуального экземпляра программного средства произойдет отработка в алгоритме структуризации сценария «неправильной» структуризации, что приведет к:

1) ложно-корректной проверке объема на хранение значения амплитуды (например, в двухбайтной записи будет утерян второй байт);

2) расчет диапазонов калибра для определения минимального информационного содержания с выдачей ложно-корректного значения (часть информации будет меняться во внешнем аппаратном модуле на не соответствующее по отношению к варианту с легитимным использованием значение, т.е. выдаваться подложное и подпадать во фрагмент с предполагаемым минимальным информационным содержанием).

Результатом сценария, где происходит ложно-корректная «неправильная» оптимизация и восстановление, является, например, проигрываемый звуковой файл, который содержит неразборчивый шум вместо исходного звукового сообщения.

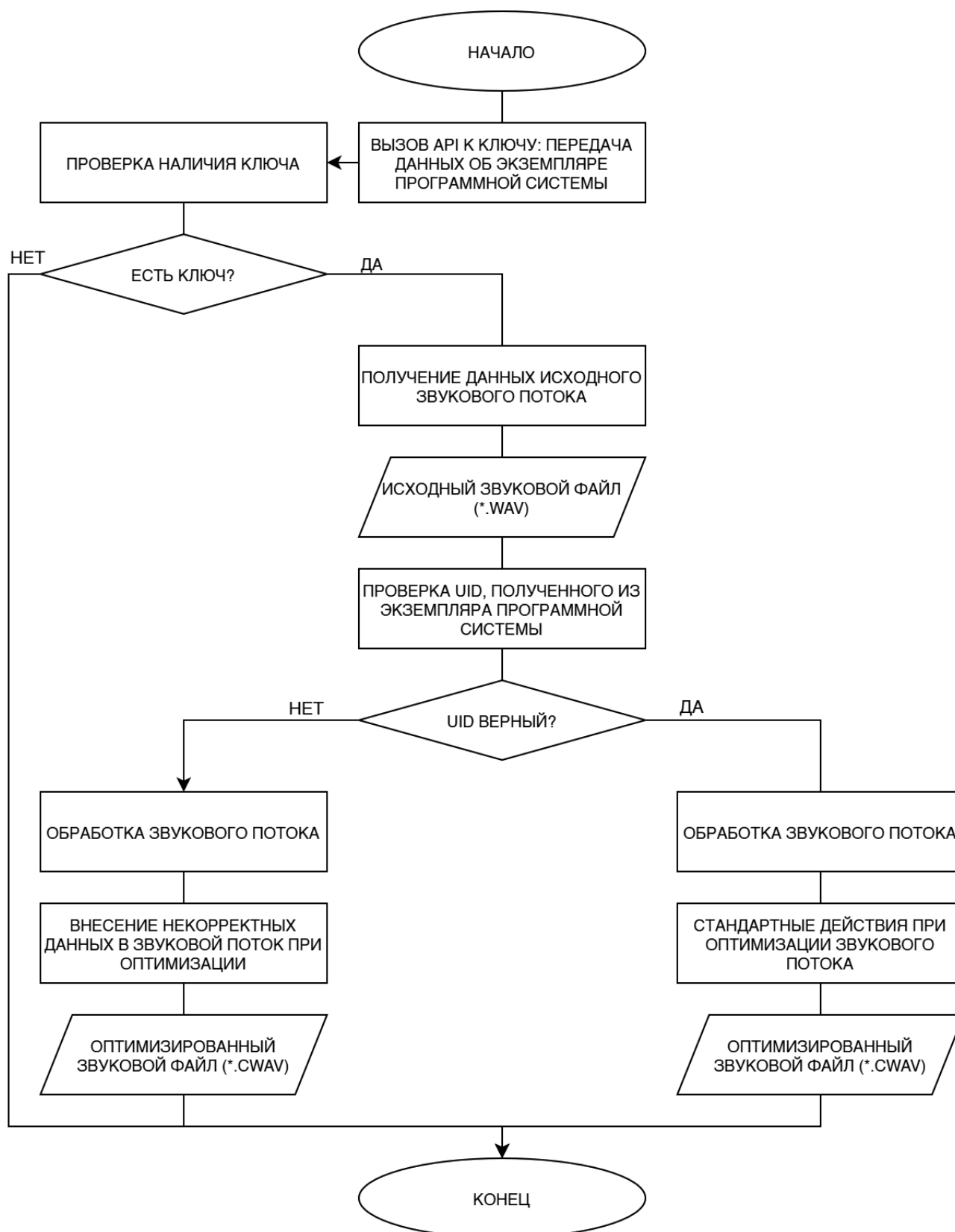


Рис. 5. Схема алгоритма определения сценариев взаимодействия индивидуального экземпляра программного средства и физического ключа

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Этот пример позволяет отразить возможность дальнейшего использования экземпляра программного средства, когда по внешним признакам злоумышленнику не будет сообщаться о неправомерности использования, а инсценироваться внешне полностью корректная работа, но с отработкой алгоритма на выдачу ложно-корректных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В представленной работе разработана и обоснована многоуровневая стратегия защиты программных средств обработки акустической информации и генерируемых ими данных. Предложенное решение базируется на объединении структурных, алгоритмических, программных и аппаратных методов защиты, позволяющих обеспечить комплексную устойчивость как самих программных компонентов, так и обрабатываемой звуковой информации к несанкционированному доступу и анализу.

В качестве базовых компонентов стратегии рассмотрены:

- структуризация и фрагментация звукового потока с использованием нестандартных методов преобразования и уплотнения;
- индивидуализация экземпляров программных решений с возможностью динамического изменения кода и структуры;
- применение механизмов обфускации программного кода для усложнения анализа логики работы;
- перенос критически важного функционала на внешний аппаратный модуль (аппаратный ключ), обеспечивающий изоляцию части вычислений и контроля запуска;

Список источников

1. Шеннон К. Теория связи в секретных системах // Проблемы передачи информации / пер. с англ. 1965. Т. 1, № 1. С. 3–18. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x>.
2. Nilsson M. The audio/mpeg Media Type. Internet Engineering Task Force. 2000. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3003> (дата обращения: 29.08.2025).
3. Балакирев Н. Е., Фадеев М. М., Родионов В. С. Качественный подход в раскрытии информационного содержания волновых данных // Труды МАИ. 2024. № 136. С. 1–21.

– формализация процедур защиты в виде операторных моделей, позволяющих описывать варианты реализации и взаимодействия алгоритмов защиты.

Практическая реализация указанных подходов продемонстрирована на примере программных комплексов «Голосовая почта» и «Акустический оптимизатор», в которых реализованы предложенные принципы защиты. Апробация решений показала, что комбинированное применение программных и аппаратных методов при поддержке организационных мер позволяет значительно повысить стойкость программных решений к анализу, копированию, подмене и декомпиляции.

Разработанная стратегия может быть адаптирована и масштабирована для других классов информационно-технических систем, ориентированных на безопасную обработку, хранение и передачу акустической информации в условиях потенциальных угроз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена комплексная стратегия защиты программных средств обработки акустической информации, объединяющая структуризацию звуковых данных, программно-аппаратные методы, включающие обфускацию и индивидуализацию экземпляров программы с применением аппаратных ключей.

Формализованная в виде операторной модели, стратегия обеспечивает устойчивость к анализу, декомпиляции и подмене. Апробация на примере систем «Голосовая почта» и «Акустический оптимизатор» подтвердила ее практическую эффективность.

References

1. Shannon C. E. Communication theory of secrecy systems. *The Bell System Technical Journal*. 1949;28(4):656–715. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x>.
2. Nilsson M. The audio/mpeg Media Type. Internet Engineering Task Force. 2000. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3003> (accessed: 29.08.2025).
3. Balakirev N. E., Fadeev M. M., Rodionov V. S. Qualitative approach in extracting the information content of wave data. *Trudy MAI*. 2024;(136):1–21. (In Russ.).
4. Balakirev N. E., Nguyen H. D., Malkov M. A. et al. Structuring and qualitative consideration of a audio

4. Балакирев Н. Е., Нгуен Х. З., Малков М. А. Структуризация и качественное рассмотрение звукового потока в системе синтеза и анализа речи // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31, № 4. С. 768–776.
5. Чижов И. И., Балабанова Т. Н. Сжатие аудиоданных на основе психоакустических принципов восприятия звука человеком // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2024. № 3. С. 127–137.
6. ГОСТ Р 34.10-2012. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Процессы формирования и проверки электронной цифровой подписи. М. : Стандартинформ, 2012. 33 с.
7. ГОСТ Р 34.12-2015. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры. М. : Стандартинформ, 2015. 25 с.
8. Курганов Е. А. О глубине аппаратной реализации блочного шифра Кузнецик // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2016. Т. 20, № 1. С. 61–78.
9. Сергеев И. С., Коновалов К. А., Балакирев Н. Е. Методы применения аппаратных способов защиты программных решений «Голосовая почта» и «Оптимизация объема акустической информации» для реализации механизма индивидуализации // Авиация и космонавтика : сб. 23-ей Междунар. конф., 18–22 ноября 2024 г., г. Москва. М. : Изд-во «Перо», 2024. С. 159.
10. Коновалов К. А. Обеспечение защиты информации в соответствии со схемой взаимодействия компонентов // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2024 : труды XVII Междунар. конф., 24–26 сентября 2024 г., г. Москва. М. : ИПУ РАН, 2024. С. 1106–1111.
11. Фадеев М. М. Обеспечение компьютерных исследований и физических экспериментов средствами воспроизведения получаемых результатов // Информатика: проблемы, методы, технологии : материалы XXIII Междунар. науч.-практич. конф. им. Э. К. Алгазинова, 15–17 февраля 2023 г., г. Воронеж. Воронеж : ВГУ, 2023. С. 730–738.
12. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. 3-е изд., испр. М. : Техносфера, 2019. С. 1048.
13. Загуменнов А. П. Компьютерная обработка звука. М. : ДМК Пресс, 2011. С. 582.
14. Mohammed A. A., Mohammed D. M. Modified phase coding audio watermarking resistant to signal attacks // International Journal of Computer Applications. 2014. Vol. 92, no. 2. P. 1–6.
15. Муzychuk Д. С., Медведев М. С. Сегментация, шумоподавление и фонетический анализ в задаче распознавания речи // Молодой ученый. 2013. № 6. С. 86–96.
- stream in a speech synthesis and analysis system. *Software & Systems*. 2018;31(4):768–776. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.031.4.768-776>. (In Russ.).
5. Chizhov I. I., Balabanova T. N. Audio data compression based on psychoacoustic principles of human sound perception. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2024;(3):127–137. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/3/127-137>. (In Russ.).
6. GOST (State Standard) R 34.10-2012. National Standard of the Russian Federation. Information technology. Cryptographic data security. Generation and verification processes of electronic digital signature. Moscow: Standartinform; 2012. 33 p. (In Russ.).
7. GOST (State Standard) R 34.12-2015. Information technology. Cryptographic data security. Block ciphers. Moscow: Standartinform; 2015. 25 p. (In Russ.).
8. Kurganov E. A. O glubine apparatnoy realizatsii blochnogo shifra “Kuznechik”. *Intellektualnye Sistemy. Teoriya i Prilozheniya*. 2016;20(1):61–78. (In Russ.).
9. Sergeev I. S., Konovalov K. A., Balakirev N. E. Metody primeneniya apparatnykh sposobov zashchity programmnykh resheniy “Golosovaya pochta” i “Optimizatsiya obema akusticheskoy informatsii” dlya realizatsii mekhanizma individualizatsii. In: *Proceedings of the 23rd International Conference: “Aviatsiya i kosmonavtika”*, November 18–22, 2024, Moscow. Moscow: Publishing the Pero; 2024. 159 p. (In Russ.).
10. Konovalov K. A. Obespechenie zashchity informatsii v sootvetstvii so skhemoy vzaimodeystviya komponentov. In: *Proceedings of the 17th International Conference: “Large-Scale System Development Management (MLSD'2024)”*, September 24–26, 2024, Moscow. Moscow: ICS RAS; 2024. p. 1106–1111. (In Russ.).
11. Fadeev M. M. Obespechenie kompyuternykh issledovaniy i fizicheskikh eksperimentov sredstvami vosproizvedeniya poluchaemykh rezultatov. In: *Proceedings of the 23rd International Scientific-Practical Conference named after E. K. Algazinov: “Information Systems and Computer Modeling”*, February 15–17, 2023, Voronezh. Voronezh: Voronezh State University; 2023. p. 730–738. (In Russ.).
12. Oppenheim A., Schafer R. Digital Signal Processing. Rev. 3rd ed. Moscow: Tekhnosfera; 2019. 1048 p. (In Russ.).
13. Zagumennov A. P. Kompyuternaya obrabotka zvuka. Moscow: DMK Press; 2011. 582 p. (In Russ.).
14. Mohammed A. A., Mohammed D. M. Modified phase coding audio watermarking resistant to signal attacks. *International Journal of Computer Applications*. 2014;92(2):1–6.
15. Muzychuk D. S., Medvedev M. S. Segmentatsyya, shumopodavlenie i foneticheskiy analiz v zadache raspoznavaniya rechi. *Young Scientist*. 2013;(6):86–96. (In Russ.).

16. Документация Guardant. Работа с Guardant Code. URL: <https://dev.guardant.ru/pages/viewpage.action?pageId=1278008> (дата обращения: 29.08.2025).
17. Obfuscator Documentation. Obfuscator. URL: <https://www.obfuscator.com/> (дата обращения: 29.08.2025).
18. Актив. Схема работы ключа. Характеристики // Guardant Code. URL: <https://www.guardant.ru/products/hardware-keys/guardant-code/> (дата обращения: 29.08.2025).
16. Guardant Documentation. Working with Guardant Code. URL: <https://dev.guardant.ru/pages/viewpage.action?pageId=1278008> (accessed: 29.08.2025). (In Russ.).
17. Obfuscator Documentation. Obfuscator. URL: https://www.obfuscator.com (accessed: 29.08.2025).
18. Guardant Code. Aktiv. Key operation scheme. Specifications. URL: <https://www.guardant.ru/products/hardware-keys/guardant-code/> (In Russ.).

Информация об авторах

Н. Е. Балакирев – кандидат технических наук, доцент;

<https://orcid.org/0009-0002-3252-0687>,
balakirev1949@yandex.ru

И. С. Сергеев – аспирант;

<https://orcid.org/0009-0001-9862-4684>,
noctisik76@gmail.com✉

К. А. Коновалов – старший преподаватель;

<https://orcid.org/0009-0008-7530-0039>,
kkonov@gmail.com

About the authors

N. E. Balakirev – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;

<https://orcid.org/0009-0002-3252-0687>,
balakirev1949@yandex.ru

I. S. Sergeev – Postgraduate;

<https://orcid.org/0009-0001-9862-4684>,
noctisik76@gmail.com✉

K. A. Konovalov – Senior Lecturer;

<https://orcid.org/0009-0008-7530-0039>,
kkonov@gmail.com

Научная статья

УДК 519.22

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-8>



К вопросу пространственных автокорреляционных функций

Андрей Владимирович Ельников✉, Вадим Андреевич Логинов
Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

Аннотация. Представлена процедура формирования пространственных автокорреляционных функций на основе коэффициентов корреляции между временными рядами, полученными в разнесенных по пространству точках наблюдений. Применение предлагаемой процедуры продемонстрировано на основе мониторинговых наблюдений общего содержания озона с борта космической платформы в средних широтах северного полушария.

Ключевые слова: корреляционные функции, временные ряды, общее содержание озона, коэффициент корреляции, корреляционная плоскость

Для цитирования: Ельников А. В., Логинов В. А. К вопросу пространственных автокорреляционных функций // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 73–79. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-8>.

Original article

Revisiting the spatial autocorrelation functions

Andrey V. Elnikov✉, Vadim A. Loginov
Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. The paper describes a process for creating spatial autocorrelation functions using correlation coefficients derived from time series data collected at various spatial observation points. The implementation of the proposed method is demonstrated using monitoring of the total ozone content from a space platform in the Northern Hemisphere mid-latitudes.

Keywords: correlation functions, time series, total ozone content, correlation coefficient, correlation plane

For citation: Elnikov A. V., Loginov V. A. Revisiting the spatial autocorrelation functions. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):73–79. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-8>.

ВВЕДЕНИЕ

В различных отраслях научно-практической деятельности общества – агрометеорологии [1], медико-биологических исследованиях [2, 3], экономике [4] и других – для выявления причинно-следственных соотношений между характеристиками или параметрами различных процессов, которые могут иметь, в том числе, разную физическую природу, широко применяются методы корреляционного анализа. Они также могут использоваться и для реконструкции строения пористых сред [5, 6] и в исследованиях вну-

тренних взаимосвязей масштабных геофизических полей [7–9].

Количественной мерой взаимосвязи анализируемых процессов являются коэффициенты корреляции, определяемые на основе данных синхронных измерений, а при условии не только синхронности, но и регулярности изменений рассчитываются автокорреляционные функции (АКФ) и взаимокорреляционные функции (ВКФ), содержащие в себе более обширную информацию о взаимосвязи исследуемых случайных процессах [10–12]. Наиболее часто для

взаимной корреляционной функции используется выражение [10]:

$$\text{ВКФ}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N x[i] \cdot y[i - \tau]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x[i]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N y[i]^2}}. \quad (1)$$

Здесь $x[i]$ и $y[i]$ – регулярные последовательности измеренных физических параметров (ряды измерений) по переменной i , отстоящие друг от друга на равные интервалы Δ (Δ – интервал дискретизации) и приведенные к нулевому среднему; N – число значений соответствующего ряда; τ – интервалы смещения рядов друг относительно друга (lag'и), определяемые как $\tau = i \cdot \Delta$. Значение ВКФ при $\tau = 0$ представляет линейный коэффициент корреляции Пирсона (КК) между исследуемыми рядами наблюдений, а каждый последующий отсчет ВКФ – это коэффициент корреляции между исходным рядом и рядом, смещенным на соответствующий lag или τ .

Если в выражении (1) используется один и тот же ряд, т.е. $y[i] \equiv x[i]$, а второй множитель, стоящий в числителе, соответственно, $y[i - \tau] \equiv x[i - \tau]$, получаем автокорреляционную функцию АКФ (τ). Аргумент τ функций ВКФ и АКФ представляет переменную, зависящую либо от времени, либо от пространства.

Процесс получения временных рядов довольно прост. В фиксированной точке пространства устанавливается датчик необходимого параметра, который регулярно выдает значения данного параметра, изменяющиеся со временем. При этом протяженность временных рядов может быть сколько угодно большой.

Организация регулярных измерений по пространству – более трудоемкий и затратный процесс, поскольку требует размещения по пространству множества датчиков на одинаковых расстояниях, количество которых будет определять длительность регистрируемого ряда.

В данной статье обсуждается процедура формирования пространственных автокорреляционных функций с использованием вре-

менных рядов, полученных в разнесенных по пространству точках наблюдений. Для описания процедуры использованы данные мониторинговых наблюдений общего содержания озона (ОСО), которые осуществляются с борта космической платформы AURA прибором OMI и приведены в [13]. Переход по данной ссылке предоставляет свободный доступ к данным ежедневных наблюдений ОСО для населенных пунктов, в которых проводятся регулярные измерения ОСО приборами наземного базирования, используемые служащие для валидации результатов независимых измерений ОСО, т.е. наземных и с космической платформы.

Озон в атмосфере является результатом фотохимических реакций, индуцируемых солнечным излучением, затем увлекаемый общей глобальной циркуляцией атмосферы и ее региональными особенностями перераспределяется по всей толще [14], образуя в атмосфере слой озона (озоносферу), который является природным щитом всех биологических структур на поверхности Земли от губительного УФ-излучения Солнца. Общепринятой единицей измерения содержания озона в атмосфере является единица Добсона (едД). Одна такая единица соответствует слою озона в 10 микрон (при стандартных давлении и температуре). Следовательно, при нормальных условиях на уровне моря 300 едД соответствуют слою озона всего в 3 мм. Озоносфера, как любое геофизическое образование, требует всестороннего комплексного изучения, в том числе и пространственно-временных взаимосвязей, а ее защитная функция вносит дополнительный элемент актуальности исследований, представленных в данной работе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве эмпирического материала в статье используются данные ОСО на территории России в период с 2005 по 2022 г. в 26 точках наблюдений. Эти точки, в соответствии с их координатами, для большинства из которых указаны и названия населенных пунктов, представлены на рис. 1. Высота вертикальных колонок для них отражает содержание

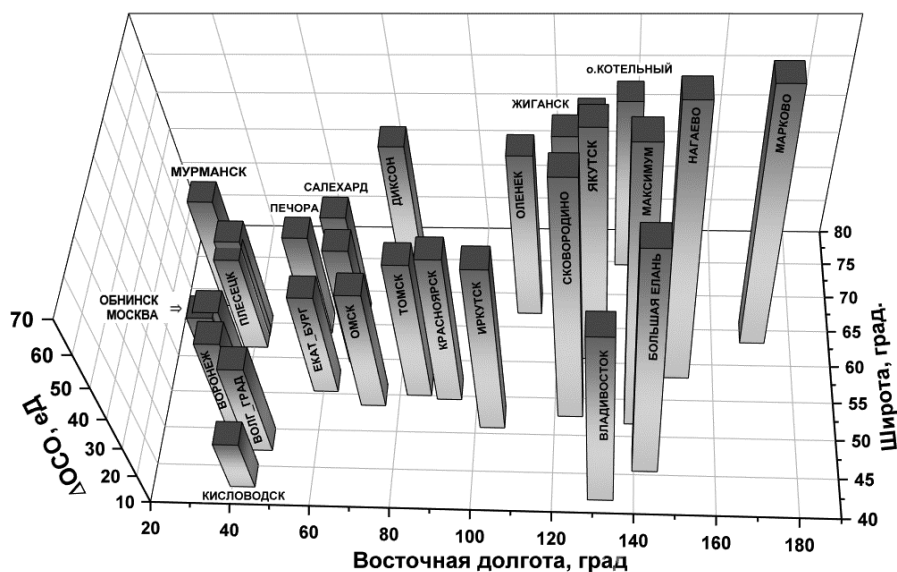


Рис. 1. Точки наблюдений ОСО на территории России и содержание озона для них за весь период наблюдений

Примечание: составлено авторами на основании используемых для анализа данных.

ОСО за весь период наблюдений, уменьшенное на 300 еД, т.е. $\Delta\text{ОСО} = \text{ОСО} - 300 \text{ еД}$. Представленные здесь результаты наблюдений позволяют охарактеризовать поле ОСО как пространственно неоднородную структуру, формируемую едиными фотохимическими процессами, обусловленными солнечной радиацией и, очевидно, между ними должна присутствовать некая взаимосвязь. Точка, обозначенная как «Максимум», – это Николаевск-на-Амуре; пункты без наименований: выше Плесецка по широте – Архангельск; между Салехардом и Омском – Ханты-Мансийск; слева от Жиганска – Тикси.

Солнечная радиация на земной поверхности имеет явно выраженный сезонный ход, который проявляется и в годовых ходах ОСО. В качестве типичного примера на рис. 2 приведен временной ход ОСО над Волгоградом в период 2005–2022 гг. Он представлен черной линией, которая, сливаясь, образует целые интервалы повышенным или пониженным содержанием озона. Сезонность является детерминированной составляющей данного временного ряда, которую необходимо удалять при анализе случайных процессов. В данной работе это реализовывалось следующим образом. Исходный временной ряд

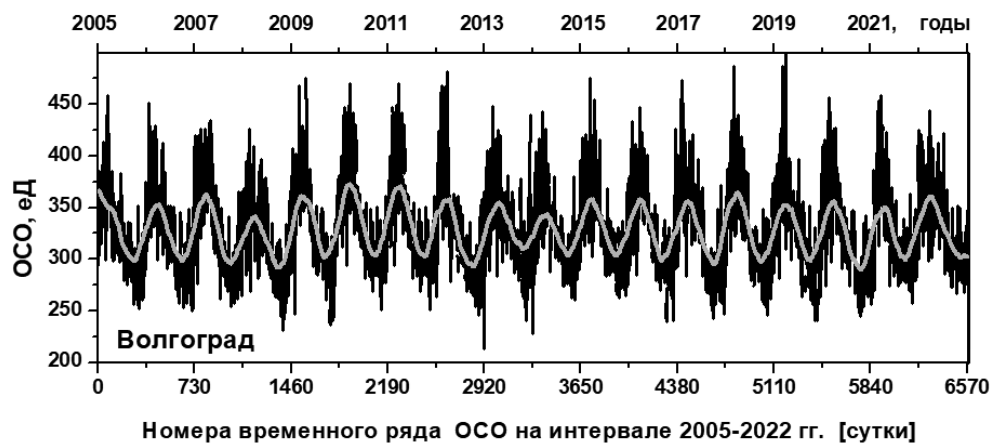


Рис. 2. Номера временного ряда ОСО для Волгограда (черная линия с выраженной вариабельностью) и результат его сглаживания скользящим средним по 182 точкам (серая линия на его фоне)

Примечание: составлено авторами на основании используемых для анализа данных.

ОСО сглаживается процедурой скользящего среднего по 182 точкам, т.е. с полугодовым интервалом. На рис. 2 результат применения данной процедуры представлен светлой линией на фоне исходного фактического ряда. Этот полученный ряд вычитался из исходного. Полученные разностные значения ОСО использовались в расчетах коэффициентов корреляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс формирования пространственных АКФ ОСО рассмотрим на основе данных ОСО вдоль параллели 55° параллели северного полушария. Для этого используем данные ОСО населенных пунктов, лежащих примерно около 55° северной широты: Обнинск, Москва, Екатеринбург, Омск, Томск, Красноярск, Иркутск, Сковородино, Николаевск-на-Амуре. Расстояние между крайними точками Об-

нинск – Николаевск-на-Амуре составляет 6119 км.

В начале вычислим коэффициенты корреляции между временными рядами ОСО в каждой точке наблюдения. Для этих 9 точек (пунктов наблюдения) число комбинаций коэффициентов корреляции будет равно 36, т.е. $N = \frac{1}{2}n \cdot (n-1)$. Очевидно, что значения полученного массива КК будут являться функцией расстоянием между пунктами наблюдений, т.е. $KK(\Delta R)$. Нанесем эти точки на плоскость в соответствии с расстоянием (см. рис. 3). Ось ординат этой плоскости отражает значения коэффициентов корреляции, а ось абсцисс – расстояние ΔR между пунктами наблюдений. Видно, что с увеличением расстояния значения коэффициентов корреляции уменьшаются, причем их спад напоминает экспоненциальную кривую вида:

$$y = A \cdot e^{-\frac{x}{B}} + C. \quad (2)$$

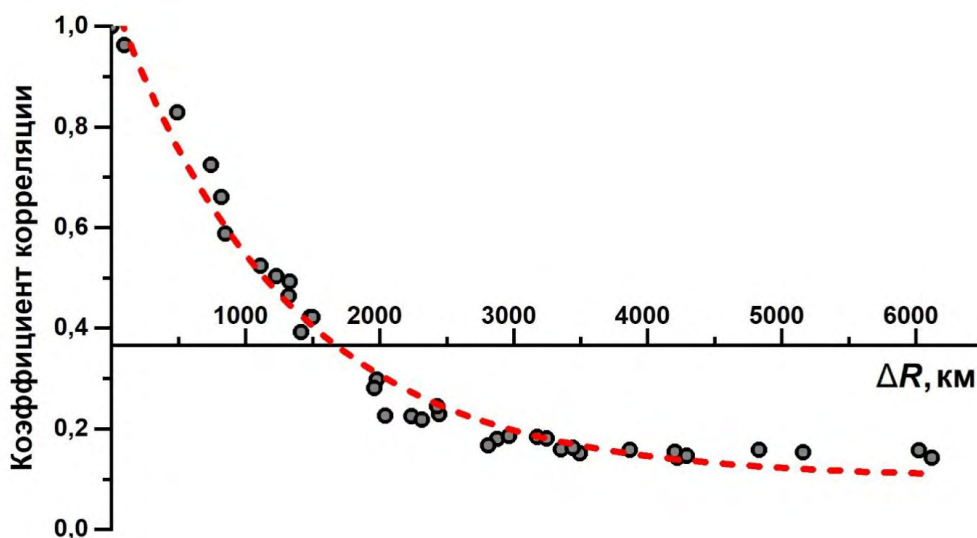


Рис. 3. Зависимость коэффициентов парной корреляции (кружки) между пунктами наблюдений от расстояния, на котором они находятся и аппроксимирующая кривая (красная пунктирная линия) с параметрами: $A = 0,96 \pm 0,02$; $B = 1294 \pm 75$; $C = 0,10 \pm 0,01$; $KD = 0,98$; $c_2 = 0,00134$

Примечание: составлено авторами на основе проведенных расчетов.

Здесь $y \equiv KK$; $x \equiv \Delta R$; A, B, C – параметры функциональной зависимости. Именно это выражение и было применено для аппроксимации методом наименьших квадратов, нанесенных на плоскость вычисленных коэффициентов корреляции временных рядов между различными пунктами наблюдений (на рисунке это красная линия). Параметры кривой

аппроксимации приведены в подрисуночной надписи вместе с параметрами статистического подобиа аппроксимирующей кривой и эмпирических точек: коэффициентом детерминации (KD), значением критерия подобиа (χ^2). Значение составляет $KD = 98\%$, что соответствует почти предельному совпадению (100%), а проверка выдвинутой гипотезы

по критерию $\chi^2 = 0,00134$ существенно меньше табличного значения на уровне 5% значимости, при превышении которого гипотеза отвергается.

При корреляционном анализе случайных процессов принято считать границей между наличием и отсутствием взаимосвязи значение коэффициента корреляции $(1/\exp) = 0,366$, поэтому на рис. 3 ось абсцисс изображена именно при этом значении коэффициента корреляции, а точка пересечения выражения (2) с осью абсцисс позволяет судить о пространственных размерах неоднородностей ОСО, вариации которых подвержены неким общим закономерностям.

На рис. 4 на плоскостях представлены значения коэффициентов в других направлениях с юга на север: в западной части России (рис. 4а) и восточной ее части (рис. 4б)

и их аппроксимационная кривая. Для формирования рис. 4а использовались данные: Кисловодск, Волгоград, Воронеж, Обнинск, Москва, Плесецк, Архангельск, Мурманск. Всего 8 пунктов наблюдений, локализованных в пределах 30-го и 40-го меридианов. В основе точек, приведенных на рис. 4б, лежат данные пунктов наблюдений: Владивосток, Большая Елань, Сквородино, Николаевск-на-Амуре, Якутск, Жиганск, Тикси, Котельный. Также 8 точек наблюдений, однако расположенных в более широком долготном интервале $125^\circ\text{--}145^\circ$ восточной долготы. Для аппроксимации точек использовалась та же модель – выражение (2). Ее параметры A, B, C и результаты проверки ее на соответствие эмпирическим точкам, которые вполне удовлетворительны, также приведены в подписях рисуночных подписях.

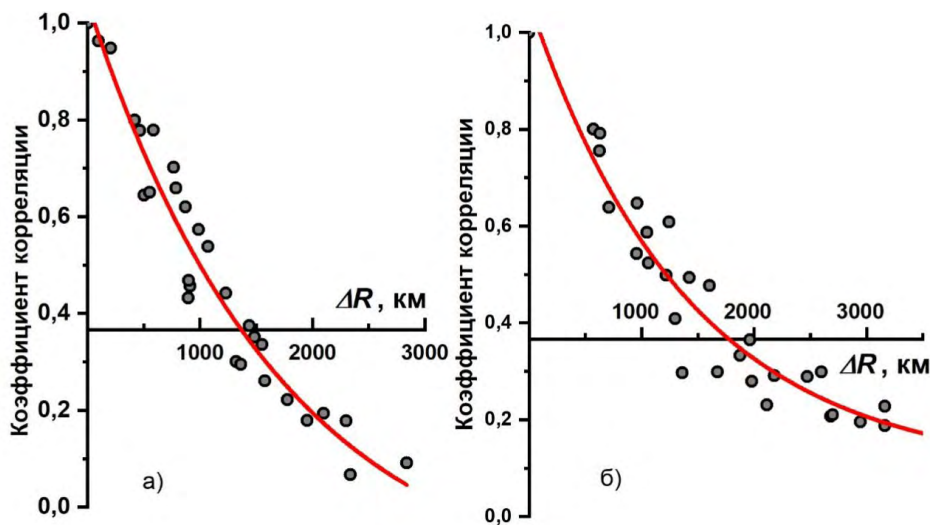


Рис. 4. Пространственные автокорреляционные функции в направлении юг–север:
а) для западной части России;
б) для восточной части России

Примечание: составлено авторами на основе проведенных расчетов.

Общим для всех рисунков является то, что значения коэффициентов корреляции уменьшаются и спад обусловлен увеличением расстояния между пунктами наблюдений, при которых получены соответствующие значения коэффициентов корреляции, поскольку другие явные факторы отсутствуют. Причем уменьшение происходит по экспоненциальному закону, что характерно для автокорреляционных функций любых природных про-

цессов, которые вычисляются, как правило, на основе выражения (1), и различие в АКФ формируется ее параметрами. В частности, крутизной спада – параметром, который присутствует в экспоненте, а его значение зависит от величины внутренней взаимосвязи в процессе.

Комментарии к выражению (1), представленные во введении, и рассуждения, приведенные в данном разделе, позволяют

утверждать, что представленные на рис. 3, 4а, 4б, функциональные зависимости, есть не что иное, как пространственные автокорреляционные функции на территории России соответственно вдоль 55-й параллели и с юга на север в ее западной и восточной частях, которые получены на основе коэффициентов парной корреляции между временными рядами регулярных наблюдений ОСО в разнесенных по пространству точках наблюдений. При этом наблюдаемое отличие в параметрах B свидетельствует об отличии процессов образования озоносферы в соответствующих направлениях, что характерно для всей атмосферы как сложной стохастической среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена оригинальная процедура формирования пространственных автокорреляционных функций на основе временных коэффициентов корреляции. Ее апробация была реализована с помощью временных рядов общего содержания озона, измеряемых прибором ОМІ с борта кос-

мической платформы AURA, для различных населенных пунктов на территории России. Представленные в статье результаты позволяют утверждать, что предлагаемый подход получения пространственных автокорреляционных функций может быть использован при корреляционном анализе пространственных полей в различных областях естествознания.

Более того, подобная процедура может быть применена для установления не только внутренних взаимосвязей одного и того же параметра, но и взаимосвязей между различными параметрами, имеющими в том числе и различную природу. В качестве примера обратимся к наземным наблюдениям метеорологических параметров: давление, температура, влажность и т. д. Результаты представляют регулярные временные ряды.

Формируя на их основе разнесенные по пространству временные коэффициенты корреляции, – но это будут уже коэффициенты взаимной корреляции, – можно получить кросс-корреляционные или взаимнокорреляционные функции исследуемых параметров.

Список источников

1. Уланова Е. С., Забелин В. Н. Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии. М. : Гидрометеиздат, 1990. 207 с.
2. Ильин В. П. Корреляционный анализ количественных данных в медико-биологических исследованиях // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. 2013. Т. 4, № 92. С. 125–130.
3. Брусов О. С., Коляскина Г. И., Каледа В. Г. и др. Использование канонического корреляционного анализа для оценки силы связи между клиническими и биологическими показателями // Журнал неврологии и психиатрии. 2010. № 1. С. 11–19.
4. Дубовик М. В., Дмитриев С. Г. Корреляционный анализ валового регионального продукта и отраслей региональной экономики // Вестник РЭУ им. Г. В. Плеханова. 2002. Т. 19, № 3. С. 109–118.
5. Герке К. М., Карсанина М. В., Скворцова Е. Б. Описание и реконструкция строения порового пространства почвы с помощью корреляционных функций // Почвоведение. 2012. Т. 45, № 9. С. 962–973.
6. Карсанина М. В. Моделирование и реконструкция структуры и свойств пористых сред с помощью корреляционных функций : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2016. 28 с.

References

1. Ulanova E. S., Zabelin V. N. Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza v agrometeorologii. Moscow: Gidrometeoizdat; 1990. 207 p. (In Russ.).
2. Iljin V. P. Correlation analysis quantitative variables in medical-biological researches. *Bulletin of the East Siberian Scientific Center SB RAMS*. 2013;4(92):125–130. (In Russ.).
3. Brusov O. S., Koliaskina G. I., Kaleda V. G. et al. The use of canonical correlation analysis for the evaluation of correlation strength between clinical and biological parameters. *S. S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2010;110(1):11–19. (In Russ.).
4. Dubovik M. V., Dmitriev S. G. Correlation analysis of gross regional product and industries of regional economy. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2002;(3):109–118. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2022-3-109-118>. (In Russ.).
5. Gerke K. M., Karsanina M. V., Skvortsova E. B. Description and reconstruction of the soil pore space using correlation functions. *Pochvovedenie*. 2012;45(9):962–973. (In Russ.).
6. Karsanina M. V. Modelirovanie i rekonstruktsiya struktury i svoystv poristyykh sred s pomoshchyu korrelyatsionnykh funktsiy. Abstracts of Cand. Sci. Thesis (Physics and Mathematics). Moscow; 2016. 28 p. (In Russ.).

7. Канасевич Э. Р. Анализ временных последовательностей в геофизике / пер. с англ. В. Н. Лисина, М. : Недра, 1985. 300 с.
8. Ельников А. В., Зуев В. В., Копысова Т. С. и др. Особенности корреляционных связей стратосферного аэрозоля // Оптика атмосферы. 1992. Т. 5, № 2. С. 193–197.
9. Ельников А. В., Зуев В. В., Маричев В. Н. Корреляционные матрицы и собственные вектора концентрации озона, отношения рассеяния аэрозоля, температуры и скорости ветра в стратосфере // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11, № 12. С. 1320–1314.
10. Кремер Н. Ш. Теория вероятности и математическая статистика. М. : ЮНИТИДАНА, 2004. 573 с.
11. Шаныгин С. И. Корреляционный и регрессионный анализ. М. : Юрайт, 2024. 70 с.
12. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / пер. с англ. И. Г. Журбенко и В. П. Носко; под ред. Ю. К. Беляева. М. : Мир, 1976. 752 с.
13. Atmospheric composition validation data center. Goddard Space Flight Center. URL: <https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/OMDOAO3/> (дата обращения: 06.09.2025)
14. Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Хлебопрос Р. Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты: моногр. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2015. 184 с.
7. Kanasevich E. R. Analiz vremennykh posledovatel'nostey v geofizike. Lisin V. N., trans. Moscow: Nedra; 1985. 300 p. (In Russ.).
8. Elnikov A. V., Zuev V. V., Kopysova T. S. et al. Oso-bennosti korrelyatsionnykh svyazey stratosfernogo aeroxolya. *Optika atmosfery*. 1992;5(2):193–197. (In Russ.).
9. Elnikov A. V., Zuev V. V., Marichev V. N. Korrelyatsionnye matritsy i sobstvennyye vektora kontsentratsii ozona, otnosheniya rasseyaniya aeroxolya, temperatury i skorosti vetra v stratosphere. *Optika atmosfery i okeana*. 1998;11(2):1320–1314. (In Russ.).
10. Kremer N. Sh. Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika. Moscow: YUNITIDANA; 2004. 573 p. (In Russ.).
11. Shanygin S. I. Korrelyatsionnyy i regressionnyy analiz. Moscow: Yurayt. 2024. 70 p. (In Russ.).
12. Zhurbenko I. G., Nosko V. P., trans.; Belyaeva Yu. K., ed. Moscow: Mir; 1976. 752 p. (In Russ.).
13. Atmospheric composition validation data center. Goddard Space Flight Center. URL: <https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/OMDOAO3/> (accessed: 06.12.2023).
14. Kashkin V. B., Rubleva T. V., Khlebopros R. G. Stratosfernnyy ozon: vid s kosmicheskoy orbity. Monograph. Krasnoyarsk: Siberian Federal university; 2015. 184 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А. В. Ельников – доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник;
<https://orcid.org/0000-0001-5511-2328>,
elnikov_av@surgu.ru✉

В. А. Логинов – старший преподаватель;
<https://orcid.org/0009-0005-5256-0522>,
loginov_va@surgu.ru

About the authors

A. V. Elnikov – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher;
<https://orcid.org/0000-0001-5511-2328>,
elnikov_av@surgu.ru✉

V. A. Loginov – Senior Lecturer;
<https://orcid.org/0009-0005-5256-0522>,
loginov_va@surgu.ru

Научная статья
УДК 519.6:621.313
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-9>



Математическое моделирование модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока на максимальных оборотах

Сергей Николаевич Ткаченко[✉], *Александра Сергеевна Кривогузова*,
Андрей Алексеевич Шпилевой

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

Аннотация. В работе проведено экспериментальное исследование модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока и разработаны математическая и параметрическая модели для расчета максимальных оборотов на основе параметров данного двигателя.

В ходе экспериментов на испытательном стенде были получены зависимости числа оборотов двигателя от тока на каждой из его фаз. Данные зависимости отражают основные режимы работы двигателя и позволяют получить значения максимального тока и оборотов.

Экспериментально установлено, что количество витков в обмотках имеет предельное значение, признаками чего является резкое увеличение максимального тока без изменения оборотов двигателя.

В работе разработана параметрическая модель, которая связывает легко измеряемые электрические характеристики модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока и батареи питания с максимальными оборотами. Также предложена математическая модель подобного двигателя, позволяющая рассчитывать максимальный ток и соответствующие обороты на основании его параметров. Показано, что при разработке подобных моделей необходимо учитывать влияние как базовых характеристик, так и значение противозлектромоторной силы, поскольку влияние последней при максимальных оборотах очень велико.

Ключевые слова: BLDC-двигатель, математическая модель, обмотки двигателя, обороты двигателя, регулятор скорости

Для цитирования: Ткаченко С. Н., Кривогузова А. С., Шпилевой А. А. Математическое моделирование модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока на максимальных оборотах // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 80–92. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-9>.

Original article

Mathematical modeling of modernized brushless direct current motor working at maximum speed

Sergey N. Tkachenko[✉], *Aleksandra S. Krivoguzova*, *Andrei A. Shpilevoi*
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Abstract. The paper presents an experimental study of a modernized brushless direct current motor and develops mathematical and parameter-oriented models for calculating maximum speed based on the characteristics of the motor.

The experiments on the test bed show the dependency relations of the motor revolutions to the current at each of its phases. The specified dependencies reflect the main motor settings and allow obtaining the peak current and speed values.

The testing establishes the fact that the winding coil amount has a limit. A sudden increase in the maximum current specifies it without changes in the number of motor revolutions.

A parameter-oriented model is developed by linking the conveniently measurable electrical characteristics of a modernized brushless direct current motor and a battery with the maximum speed. Also, a mathematical model of such a motor is proposed, which makes it possible to calculate the peak current and corresponding

revolutions based on its parameters. The study shows the necessity of considering the influence of the chief characteristics and counter-electromotive force while working on the development of similar models, as the impact of the latter is a major at maximum speed.

Keywords: BLDC motor, mathematical model, motor windings, motor speed, speed controller

For citation: Tkachenko S. N., Krivoguzova A. S., Shpilevoi A. A. Mathematical modeling of modernized brushless direct current motor working at maximum speed. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):80–92. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-9>.

ВВЕДЕНИЕ

Использование бесщеточных двигателей постоянного тока (BLDC-двигатели) возрастает год к году уже в течение более пяти лет [1, 2]. При этом область их применения чрезвычайно обширна: от электроинструмента до подводных аппаратов [1, 3]. Наиболее часто BLDC-двигатели применяются в беспилотных летательных аппаратах и электротранспорте (автомобили, самокаты и прочее) [4].

В настоящее время активно ведутся работы по модернизации BLDC-двигателей, прежде всего для повышения надежности их работы. К числу основных причин выхода из строя подобных двигателей можно отнести [4, 5] механические повреждения и перегрев, которые происходят, как правило, при работе на предельных оборотах, и электрический пробой изоляции обмоток вследствие токовых перегрузок на старте или при максимальных нагрузках.

Подходы к модернизации BLDC-двигателей можно разделить на несколько типов: основанные на применении инновационных методов контроля работы двигателя [6, 7]; также является популярным подход, основанный на применении искусственного интеллекта к управлению двигателем [8, 9]; и комплексный подход [10, 11], включающий в себя конструкционные изменения как самого двигателя, так и устройств, которые им управляют (в частности, регулятор скорости).

Авторы придерживаются мнения, что наиболее перспективным является комплексный подход, о чем также свидетельствует появление в последнее время ряда работ [12–14] по модернизации BLDC-двигателей путем увеличения количества фаз (то есть более

традиционных трех фаз). Изменение количества фаз приводит к повышению стабильности и безотказности работы двигателя. Подобное конструкционное решение также влечет необходимость разработки новых регуляторов скорости или мощности (ESC-регулятор), способных управлять в режиме реального времени большим количеством отдельных фаз или обмоток.

Конструктивно BLDC-двигатель представляет собой статор с обмотками и постоянными магнитами и вращающийся в нем ротор. Одна из наиболее часто встречающихся конструкций BLDC-двигателя – 12N14P имеет 12 обмоток статора и 14 магнитных полюсов ротора. При этом двигатель является трехфазным, и обмоток по факту не двенадцать, а только три. Один провод навит вокруг четырех магнитов.

Вместо традиционной схемы с тремя обмотками (которые соответствуют трем фазам) можно использовать 12 отдельных обмоток. Это позволит регулировать ток в каждой обмотке в отдельности, обеспечивая более точный контроль магнитного поля и крутящего момента. Подобная модернизация улучшает динамические характеристики двигателя, снижает пульсации, обеспечивает более гибкую адаптацию под различные режимы работы и повышает надежность системы.

При переходе к двенадцати отдельным обмоткам важно понимать, как меняются его эксплуатационные характеристики, прежде всего ток и обороты. Как уже говорилось выше, именно эти параметры определяют вероятность выхода двигателя из строя. Ранее уже были проведены исследования модернизированного BLDC-двигателя на минимальных оборотах [15], поэтому цель данной работы –

экспериментальное определение влияния параметров модернизированного BLDC-двигателя на величину его максимальных оборотов и построение математических моделей, которые позволяли бы определять максимальные обороты модернизированного BLDC-двигателя на основании его параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поскольку конфигурация BLDC-двигателя 12N14P является одной из наиболее часто встречающихся, то для проведения исследований был выбран подобный двигатель. В частности, Brother Hobby Avenger 2806,5 1300kV в котором на роторе установлены дуговые магниты N52H, статор выполнен из кремнистой стали Kawasaki 0,2 мм, материал корпуса – алюминиевый сплав Al 7075, а вал является полым и выполнен из титанового сплава. В двигателе используется медная обмотка сечением 0,75 мм.

Два двигателя были разобраны и перемотаны медным проводом того же сечения, после чего получилось двенадцать отдельных обмоток, каждая со своим отдельным выводом (см. рис. 1). Каждая из двенадцати обмоток размещена в отдельном пазу в соответствии со схемой статора.

Измерения характеристик проводились на двух модернизированных двигателях, оснащенных винтом, с целью обеспечения повторяемости получаемых значений. Никаких отличий в работе первого и второго модернизированных двигателей не наблюдалось.

В качестве батареи питания был использован источник постоянного тока GW INSTEK GPD-73303S. Также использовался стандарт-



Рис. 1. BLDC-двигатель Brother Hobby Avenger 2806,5 1300kV до перемотки (слева) и после перемотки с убранным ротором (справа)

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

ный трехфазный ESC-регулятор, поскольку регуляторы для работы с модернизированными двигателями в свободной продаже не существует. Подключение регулятора скорости к модернизированному двигателю осуществлялось путем подачи напряжения на каждую из обмоток. Причем с каждой из фаз ESC-регулятора напряжение подавалось на четыре обмотки двигателя.

Измерения были проведены при различном количестве витков (от 8 до 16) в каждой из обмоток двигателя с шагом в один виток. Напряжение питания на источнике изменялось в диапазоне 5–7 В с шагом в 1 В. Относительно узкий диапазон напряжений обусловлен тем, что при питании, превышающем 7 В, двигатель почти сразу выходит на максимальные обороты, и построить зависимости, подходящие для анализа, проблематично.

Ток измерялся на входе двигателя при помощи цифрового универсального измерителя Tektronix DMM4020 с базовой погрешностью 0,015 %.

На вал двигателя был прикреплен винт с укрепленной на нем светоотражающей полосой для измерения частоты оборотов. Для этого использовался цифровой тахометр лазерного типа DT2234A с разрешением 1 RPM для всего измеряемого диапазона и точностью $\pm 0,05\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были получены зависимости рабочих оборотов модернизированного BLDC-двигателя от тока в каждой из фаз при всех указанных в предыдущем разделе уровнях напряжения источника тока и количестве витков в обмотке.

Типовой график приведен на рис. 2. Все зависимости числа оборотов двигателя от величины тока, полученные в данной работе, имеют аналогичный характер.

Как можно видеть из рис. 2, на графике зависимости числа оборотов двигателя от тока можно выделить несколько характерных участков. Точка 1 соответствует пусковому току и стартовым оборотам двигателя. На участке 1–2 наблюдается линейный рост числа оборотов двигателя, причем небольшие

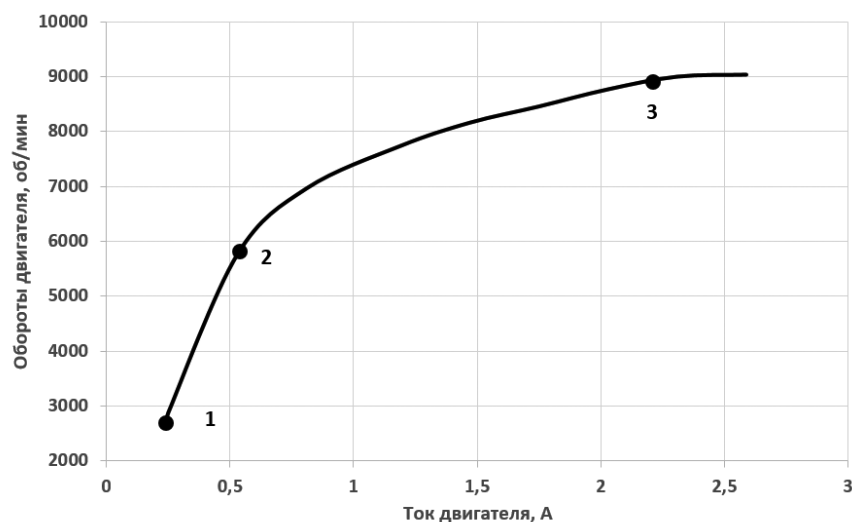


Рис. 2. Типовая зависимость числа оборотов двигателя от тока на каждой из фаз при фиксированном уровне напряжения батареи и количестве витков в обмотке

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

изменения рабочего тока приводят к значительному увеличению числа оборотов. Точка 2 соответствует среднему значению числа оборотов двигателя, в которой наблюдается перегиб и изменение угла наклона кривой. Видно, что на участке 2–3 требуется значительное изменение рабочего тока для обеспечения заметного роста числа оборотов двигателя. Можно говорить о нарастающем «насыщении» двигателя, которое достигает своего максимума в точке 3, после которой появляется заметная противо-ЭДС [16], и дальнейшее повышение тока не приводит к какому-либо изменению числа оборотов двигателя. Противо-ЭДС (электромоторная сила) появляется в любом BLDC-моторе и представляет собой индуцированное напряжение, возникающее из-за движения ротора в магнитном поле обмоток статора, которое противодействует приложенному питающему напряжению. Величина противо-ЭДС пропорциональна скорости вращения.

Таким образом, соответствующие точке 3 значения числа оборотов и тока (рис. 2) можно считать максимальными.

Далее в работе под максимальным током (I_{\max}) будем понимать ток на каждой из фаз двигателя (он же на выходе из ESC-регулятора), при котором появляется влияние противо-ЭДС. Максимальные обороты двигателя

(RPM_{\max}) — это число оборотов двигателя, соответствующих значению максимального тока.

На рис. 3 приведены зависимости максимального числа оборотов двигателя и максимального тока от числа витков в каждой из обмоток при уровне напряжения батареи 6 В. При других уровнях напряжения батареи были получены аналогичные зависимости.

Как следует из рис. 3, с увеличением числа витков обмотки в интервале от 8 до 14 наблюдается снижение как максимального тока, так и максимальных оборотов двигателя, что объясняется увеличением индуктивности каждой из катушек двигателя. Однако с ростом числа витков, начиная с 14, максимальный ток резко возрастает (по сравнению с предыдущим участком кривой), а значение максимальных оборотов, наоборот, резко снижается. Подобное нестандартное поведение модернизированного двигателя свидетельствует о следующем. Во-первых, количество витков в каждой из катушек достигает целесообразного предела (14 витков). Во-вторых, дальнейший рост индуктивности катушек сказывается крайне негативно на работе модернизированного двигателя — причиной подобного поведения могут быть несбалансированный магнитный поток и пульсации тока.

В этой связи представляется целесообразным ограничить диапазон витков в катушке

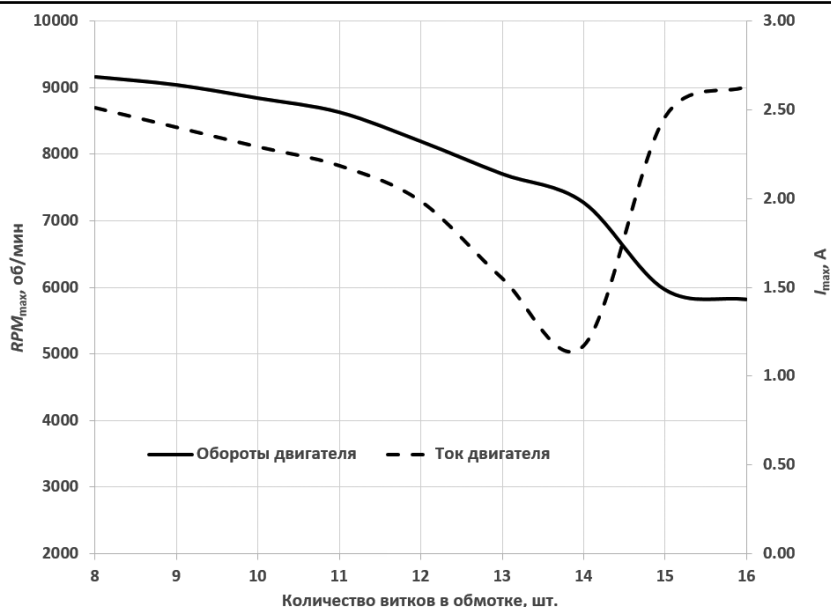


Рис. 3. Зависимость максимального числа оборотов двигателя и максимального тока от числа витков в каждой из обмоток при уровне напряжения батареи 6 В

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

интервалом от 8 до 14 включительно. В этом случае между максимальными оборотами и током будет наблюдаться зависимость, которая с высокой точностью аппроксимируется прямой линией. Примером подобной зависимости может служить график, представленный на рис. 4. При других уровнях напряжения батареи наблюдаются аналогичные зависимости.

Учитывая линейный характер зависимости, представленной на рис. 4, можно построить параметрическую модель для определения максимальных оборотов двигателя на основании легко измеряемых параметров данного двигателя и сопутствующих устройств.

Очевидно, что наиболее важным параметром данной модели будет максимальный ток, однако, помимо него, влияние на максималь-

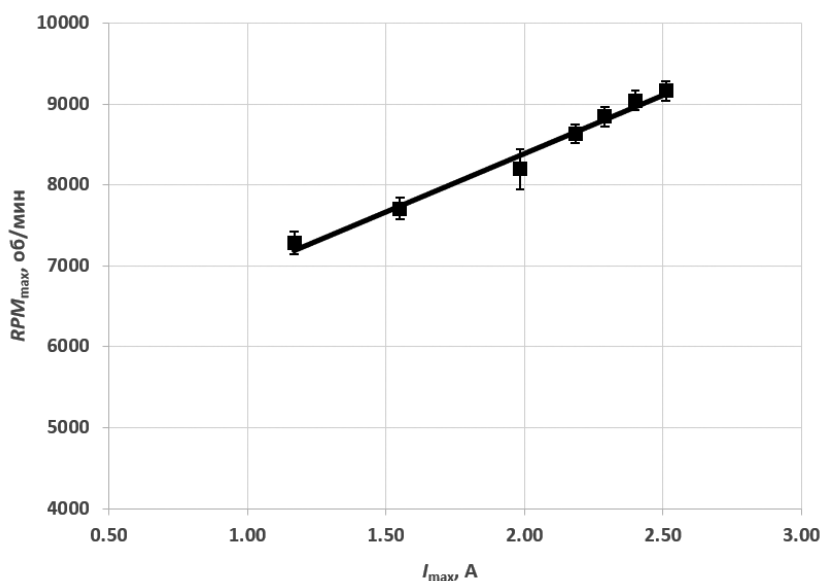


Рис. 4. Зависимость максимального числа оборотов двигателя от максимального тока при уровне напряжения батареи 6 В

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

ные обороты должен оказывать и уровень напряжения батареи. Чем выше напряжение, тем больше должны быть обороты, то есть должна наблюдаться прямая зависимость.

Помимо этих двух величин на обороты двигателя должны оказывать влияние физические параметры двигателя. Для учета подобных характеристик может быть предложена величина RPM_0 , определяемая физическими параметрами двигателя: количеством обмоток, установленными магнитами, их количеством и формой, сердечником и т. д. Данная величина не зависит от напряжения батареи и величины тока. В связи с этим RPM_0 будет характерна для конкретной модели двигателя и входить в параметрическую модель как константа.

Для понимания физического смысла RPM_0 можно воспользоваться следующей аналогией – это величина оборотов двигателя, обусловленная внутренней индуктивностью конкретной модели при одном витке на каждой из обмоток.

Число витков в каждой из обмоток также должно коррелировать со значением максимальных оборотов, однако, как показано на рис. 3, в значении максимального тока уже присутствует данное влияние, поэтому отдельного параметра в разрабатываемой модели, ассоциированного с числом витков в обмотке, не требуется.

Еще одним параметром модели должна стать потеря мощности, обусловленная эффектом «насыщения», который представлен на участке 2–3 рис. 2. Поскольку мы учитываем значение максимального тока, то пренебрегать негативным влиянием противо-ЭДС нельзя.

Таким образом, в разрабатываемой параметрической модели будут присутствовать четыре параметра. При этом мы предполагаем, что зависимость максимальной скорости вращения ротора от всех перечисленных выше параметров носит линейный характер:

$$RPM_{\max} = k_1 \cdot I_{\max} + k_2 \cdot V_{bat} + k_3 \cdot V_{bat} \cdot I_{\max} + b,$$

где k_1 , k_2 и k_3 – коэффициенты регрессии, определяющие вклад каждого параметра,

а b – свободный коэффициент, ассоциированный со значением RPM_0 , I_{\max} – значение максимального тока, V_{bat} – значение напряжения от батареи.

При этом значение скорости является случайной величиной, в наиболее простом случае нормально распределенной вокруг предсказанного линейной моделью значения:

$$RPM_{\max} \sim RPM_{\max}(\mu(I_{\max}, V_{bat}, V_{bat} \cdot I_{\max}, b), \sigma^2),$$

где $\mu(I_{\max}, V_{bat}, V_{bat} \cdot I_{\max}, b)$ определяется линейной моделью, а σ^2 – дисперсия ошибок измерения. Объединяя обе модели в одну, получаем следующую формулу:

$$RPM_{\max,i,j} \sim RPM_{\max}(k_1 \cdot I_{\max,i} + k_2 \cdot V_{bat,j} + k_3 \cdot V_{bat,j} \cdot I_{\max,i} + b, \sigma^2).$$

В данном случае $RPM_{\max,i,j}$ обозначает ожидаемое значение оборотов двигателя при соответствующих значениях I_{\max} , V_{bat} и b . Значения коэффициентов k и b определяются, решая оптимизационную задачу, минимизируя сумму квадратичных наблюдений от наблюдаемых значений.

По результатам численного моделирования [17] на основе объединения линейных и вероятностных моделей была разработана параметрическая модель, которая определяет максимальные обороты двигателя по значениям максимального тока и напряжению батареи для диапазона витков в обмотке от 8 до 14.

В результате моделирования была получена следующая аналитическая зависимость:

$$RPM_{\max} = RPM_0 + 1750 \cdot I_{\max} + 200 \cdot V_{bat} + 52 \cdot V_{bat} \cdot I_{\max} \quad (1)$$

где RPM_0 для рассматриваемого двигателя получилось равным 4288. Очевидно, что коэффициенты в формуле (1) также зависят от параметров конкретного двигателя и должны определяться индивидуально.

Таким образом, становится возможным рассчитать значение максимальных оборотов двигателя по измеряемым характеристикам тока и напряжению батареи для различного количества витков.

В таблице приведены значения максимальных оборотов двигателя, рассчитанные по формуле (1), в сравнении с вели-

чинами, измеренными экспериментально. Для примера были взяты различные значения $V_{\text{бат}}$ и I_{max} .

Таблица

Сравнение значений максимальных оборотов двигателя, полученных экспериментально и на основе расчета по формуле (1)

Количество витков в каждой из обмоток двигателя, шт.	RPM_0 , об/мин	$V_{\text{бат}}$, В	I_{max} , А	RPM_{max} , об/мин (эксперим.)	RPM_{max} , об/мин (расчет)	Относительная погрешность
8	4 288	5	2,47	9 124	8 968	1,71 %
9		6	2,40	9 042	8 939	1,14 %
10		7	2,43	8 959	9 056	-1,08 %
11		5	1,52	7 540	7 553	-0,17 %
12		6	1,98	8 196	8 335	-1,70 %
13		7	1,88	8 390	8 294	1,14 %
14		5	0,66	6 087	6 271	-3,02 %

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Как видим из таблицы, относительная погрешность не превышает $\pm 3\%$. Для всех остальных точек в рассматриваемом пространстве признаков относительная погрешность находится в пределах $\pm 5\%$.

Таким образом, можно утверждать, что предложенная в работе формула (1) позволяет с достаточной точностью определить максимальные обороты двигателя.

Предложенная параметрическая модель предполагает наличие BLDC-двигателя, параметры которого могут быть измерены на испытательном стенде, однако на стадии проектирования двигателя невозможно измерить максимальное значение тока. По этой причине для полноты разрабатываемого подхода необходимо разработать математическую модель, которая связывала бы фундаментальные характеристики двигателя (сопротивление и индуктивность его обмоток и др.) со значением максимального тока. А уже из значений последнего всегда можно получить и значение максимальных оборотов двигателя.

Напряжение в каждой из обмоток двигателя описывается уравнением [18]:

$$V_i = R_i I_i + \sum_{j=1}^n L_{ij} \frac{dI_j}{dt} + e_{\text{back-EMF}, i},$$

где V_i – напряжение на i -й обмотке; R_i – активное сопротивление i -й обмотки; I_i – ток в i -й обмотке; $e_{\text{back-EMF}, i}$ – противо-ЭДС на i -й обмотке.

Матрица индуктивности L имеет вид [19]:

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & L_{22} & \dots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix},$$

где L_{ii} – самоиндуктивность для i -й обмотки; M_{ij} – взаимная индуктивность обмоток.

Магнитный поток через обмотку можно выразить через ее индуктивность L_i и ток I_i :

$$\Phi_i = L_i \cdot I_i$$

Для учета взаимодействия между обмотками можно использовать взаимную индуктивность M_{ij} , которая будет влиять на магнитный поток через соседние обмотки:

$$\Phi_{ij} = M_{ij} \cdot I_j$$

Увеличение числа витков усиливает магнитное поле, что увеличивает запасаемую энергию в обмотке. В результате самоиндуктивность каждой обмотки будет определяться как:

$$L_{ii} = L_0 + \alpha N_{\text{витков}}^2 + \gamma N_{\text{витков}},$$

где L_0 – начальная самоиндуктивность обмотки; α – коэффициент зависимости от числа витков; γ – коэффициент насыщения; $N_{\text{витков}}$ – число витков обмотки.

С ростом числа витков взаимное влияние обмоток снижается, так как магнитные поля между ними начинают компенсировать друг друга из-за их перекрытия или насыщения материала. Взаимная индуктивность, экспоненциально зависящая от числа витков:

$$M_{ij} = M_0 e^{-\beta N_{\text{витков}}},$$

где M_0 – начальное значение взаимной индуктивности при $N_{\text{витков}} = 0$; β – коэффициент ослабления взаимного влияния токов в обмотках.

Для учета динамических эффектов, таких как противо-ЭДС, вводим тензор второго порядка:

$$L_{ij} = \begin{cases} L_{ij} + f_i(N_{\text{витков}}, t), & i = j \\ M_{ij} \cdot g_k(t), & i \neq j, \end{cases}$$

где $f_i(N_{\text{витков}}, t) = \gamma \cdot N_{\text{витков}} \cdot \sin(\omega t)$ – функция насыщения индуктивности, отражающая нелинейность; $g_k(t) = 1 - \delta \cdot \cos(\omega t)$ – функция временного изменения взаимной индуктивности, связанная с фазовыми колебаниями; ω – угловая скорость двигателя; t – время; γ – коэффициент насыщения индуктивности; δ – коэффициент, описывающий амплитуду колебаний взаимной индуктивности.

Значение f_i отражает зависимость магнитного потока от насыщения магнитного материала, которая усиливается с увеличением числа витков. Значение g_k учитывает влияние временных колебаний, вызванных угловой скоростью ротора, на динамические характеристики системы [20].

Противо-ЭДС в каждой из обмоток можно определить по формуле:

$$e_{\text{back-EMF},i} = k_e \cdot \omega \cdot N_{\text{витков}} \cdot \sin(\theta_i),$$

где θ_i – фазовый угол i -й обмотки, который зависит от углового положения ротора относительно магнитного поля статора; k_e – коэффициент противо-ЭДС.

Вектор противо-ЭДС:

$$e_{\text{back-EMF}} = \begin{bmatrix} k_e \cdot \omega \cdot \sin(\theta_1) \\ k_e \cdot \omega \cdot \sin(\theta_2) \\ \vdots \\ k_e \cdot \omega \cdot \sin(\theta_n) \end{bmatrix}.$$

Максимальный ток можно рассчитать по закону Ома через напряжение и сопротивления обмотки.

Чтобы рассчитать обороты, нужно учесть зависимость угловой скорости от напряжения и тока. Угловая скорость может быть выражена через токи и индуктивности:

$$\omega = \frac{V_{\text{max}} - R_i \cdot I_i}{k_e \cdot N_{\text{витков}}},$$

где k_e – коэффициент противо-ЭДС.

Теперь, с учетом всех нелинейных зависимостей, напряжение на обмотках можно записать как:

$$V_i = R_i I_i + \sum_{j=1}^n L_{ij}(t, \omega, \phi) \frac{dI_j}{dt} + e_{\text{back-EMF},i},$$

где $L_{ij}(t, \omega, \phi)$ – элементы тензора индуктивности, зависящие от времени t , угловой скорости ω и фазового угла ϕ .

Общая модель для всех элементов индуктивности:

$$L_{ij}(t) = L_1 + \alpha_1 N_{\text{витков}}^2 + \gamma \cdot \varphi_i \cdot M_{12} \cdot g_k + \beta_1 \cdot f(N_{\text{витков}}) + M_{ij} \cdot f_k(\omega, \phi) + R_{\text{магн}} \cdot I_i + \frac{dM_{ij}}{dt} \cdot I_j, \quad (2)$$

где $L_1 + \alpha_1 N_{\text{витков}}^2$ – самоиндуктивность, которая зависит от квадратичного тока и насыщения; $\beta_1 \cdot f(N_{\text{витков}})$ – учитывает нелинейную зависимость индуктивности от числа витков из-за насыщения магнитопровода; $M_{ij} \cdot f_k(\omega, \phi)$ – взаимная индуктивность, зависящая от угловой скорости и фазового угла ротора; $R_{\text{магн}} \cdot I_i$ – эквивалентное сопротивление, моделирующее потери в магнитной системе; $\frac{dM_{ij}}{dt} \cdot I_j$ – дополнительное слагаемое, учитывающее изменения взаимной индуктивности во времени.

В общем случае тензор индуктивности L_{ij} учитывает как самоиндуктивность отдельных фаз, так и взаимную индуктивность между

ними. Самоиндуктивность каждой фазы определяется выражением $L_i + \alpha_i N_{\text{витков}}^2 + \gamma_i \varphi_i$, отражающим влияние насыщения магнитного материала и нелинейных эффектов. Взаимная индуктивность между фазами представляется элементами $M_{ij} \cdot g_k$, зависящими от угловой скорости ротора, фазового угла и времени.

С учетом этих факторов тензор индуктивности можно записать в матричной форме [21]:

$$L_{ij} = \begin{bmatrix} L_1 + \alpha_1 N_{28B: >2}^2 + \gamma_1 \cdot \varphi_1 \cdot M_{12} \cdot g_k \cdots M_{1n} \cdot g_k \\ L_2 + \alpha_2 N_{28B: >2}^2 + \gamma_2 \cdot \varphi_2 \cdot M_{21} \cdot g_k \cdots M_{2n} \cdot g_k \\ \vdots \\ L_n + \alpha_n N_{28B: >2}^2 + \gamma_n \cdot \varphi_n \cdot M_{n1} \cdot g_k \cdots M_{nm} \cdot g_k \end{bmatrix}.$$

Напряжение в i -й обмотке с учетом взаимной индукции можно выразить как:

$$V_i = R_i I_i + \sum_{j=1}^n L_{ij} + \alpha_i N_{\text{витков}}^2 + \gamma_i \cdot f_i \cdot M_{ij} \cdot g_k + \frac{dI_j}{dt} + k_e \cdot \omega \cdot N_{\text{витков}} \cdot \sin(\theta_i),$$

где $R_i I_i$ – это напряжение, обусловленное сопротивлением и током; $\sum_{j=1}^n L_{ij}$ – это самоиндуктивность и взаимная индуктивность; $\alpha_i N_{\text{витков}}^2$ – влияние числа витков; $\gamma_i \cdot f_i \cdot M_{ij} \cdot g_k$ – влияние взаимной индуктивности и угловой скорости; $\frac{dI_j}{dt}$ – дополнительный эффект из-за изменения тока; $k_e \cdot \omega \cdot N_{\text{витков}} \cdot \sin(\theta_i)$ – эффект противо-ЭДС, который зависит от угловой скорости и фазы ротора.

Этот подход позволяет получить математическую модель, которая описывает поведение BLDC-двигателя на максимальных оборотах в зависимости от числа витков обмотки, включая как линейные, так и нелинейные зависимости его индуктивности и сопротивления.

Модель BLDC-двигателя с функцией изменения количества витков позволяет исследовать влияние изменения параметров катушки (в частности, количества витков) на максимальный ток, который двигатель способен провести. Учитывая физические явления, такие как потери на сопротивление, температурные эффекты, магнитное насыщение и паразитные токи, модель позволяет предсказать, как изменения в конфигурации катушки влия-

ют на рабочие характеристики двигателя, включая его эффективность и стабильность.

С помощью данной модели можно точно прогнозировать максимальный ток при разных количествах витков катушки, что дает возможность оптимизировать работу двигателя для различных приложений. Например, можно выполнить настройку параметров для улучшения динамических характеристик двигателя или для повышения его энергетической эффективности. Тем самым использование разработанной математической модели способствует корректировке и улучшению конструкции двигателя.

На рис. 5 представлены расчетные зависимости максимального числа оборотов двигателя и максимального тока от числа витков при уровне напряжения батареи 6 В. Данные зависимости рассчитаны на основании представленной математической модели.

На рис. 6 представлены для сравнения зависимости максимального тока, полученные экспериментально и расчетным путем.

Как можно видеть из рис. 6, предложенная математическая модель (2) очень хорошо согласуется с экспериментом. Аналогичное совпадение было продемонстрировано и для других исследованных уровней напряжения источника питания. Таким образом, модель может быть использована для практического применения при проектировании модернизированных BLDC-двигателей различной конфигурации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен модернизированный BLDC-двигатель, который при его доведении до серийного уровня может быть применен в различных сферах деятельности, в том числе требующих высокой надежности.

Представлены экспериментальные зависимости наиболее значимых характеристик модернизированного BLDC-двигателя: максимального числа оборотов двигателя и максимального тока от числа витков в каждой из обмоток при различном уровне напряжения источника питания.

В работе разработана параметрическая модель для расчета максимальных оборотов двигателя на основании электрических дан-

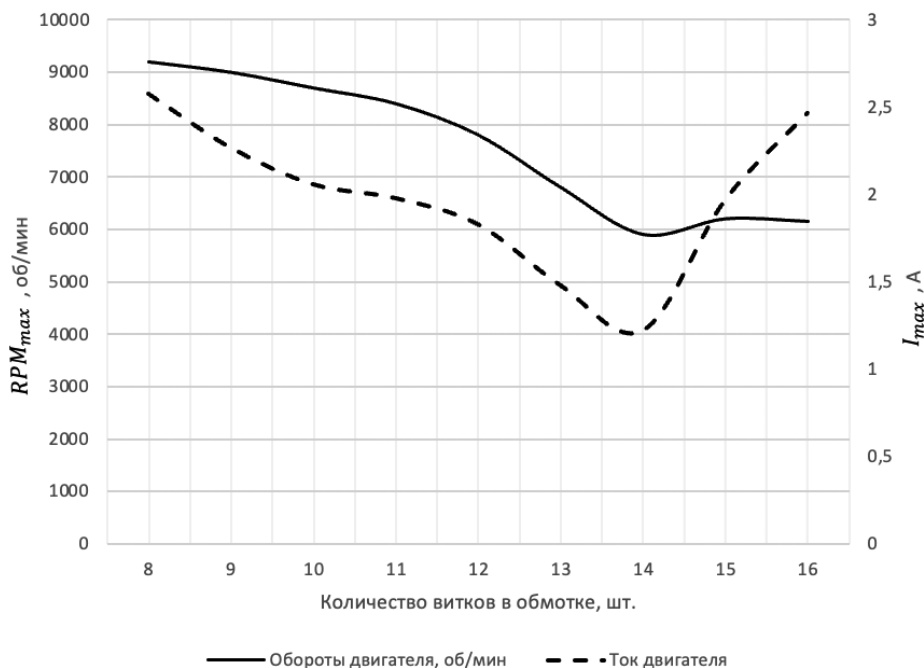


Рис. 5. Результаты моделирования по модели (2) RPM_{max} и I_{max} от числа витков в каждой из обмоток при уровне напряжения 6 В

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

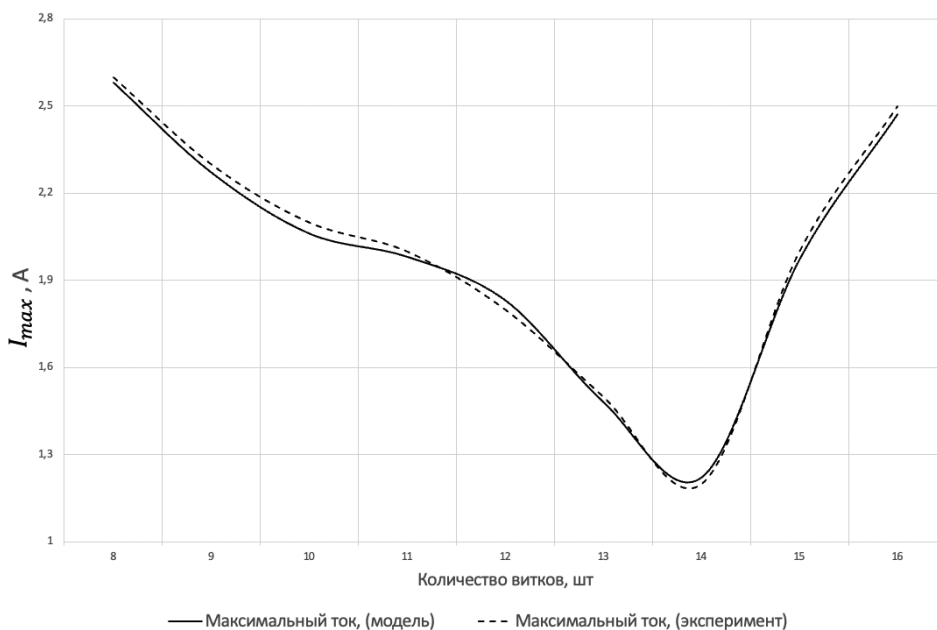


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные зависимости максимального тока от числа витков в обмотках при уровне напряжения батареи 6 В

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

ных двигателя и источника питания, что позволяет существенно ускорить определение одной из наиболее важных характеристик двигателя.

При разработке параметрической модели учтены различные факторы двигателя,

в том числе негативное влияние противо-ЭДС на мощность и обороты двигателя.

Для случая проектирования двигателя предложена математическая модель определения максимального тока (через значение которого можно рассчитать максимальные

обороты) на основе таких внутренних характеристик двигателя, как индуктивность каждой из катушек, взаимная индуктивность, их сопротивление и количество. Достоинствами разработанной математической модели является учет потерь на противо-ЭДС и температурные изменения электрических характеристик при работе двигателя. Все это позволило

добиться хорошего соответствия между расчетными и экспериментальными значениями.

Дальнейшая работа над модернизированным двигателем планируется в области создания комплексной математической модели, которая отражала бы работу данного устройства не только на максимальных оборотах, но и в более широком рабочем диапазоне.

Список источников

1. Deepak M., Arul David R., Verma R. et al. A review of BLDC motor: State of art, advanced control techniques, and applications // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011>.
2. Kumarasamy V., Valluvan K. R., Chandrasekaran G. et al. A review of integer order PID and fractional order PID controllers using optimization techniques for speed control of brushless DC motor drive // *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2023. Vol. 14. P. 1139–1150. <https://doi.org/10.1007/s13198-023-01952-x>.
3. Nisha R., Gnana Sheela K. Review of PV fed water pumping systems using BLDC Motor // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 24. Pt. 3. P. 1874–1881. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.612>.
4. Andrioiu D. A., Gaitan V. G. Finding fault types of BLDC motors within UAVs using machine learning techniques // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, no. 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30251>.
5. Du J., Sun Y., Zhao J. et al. Loss research and thermal analysis of BLDC hollow-cup motor under reactor suppression // *Applied Sciences*, 2025. Vol. 15, no. 3. <https://doi.org/10.3390/app15031523>.
6. Machhour Z., Mrabet M. E., Mekrini Z. et al. Comparative study between DTC and FOC control strategies applied to the BLDC motor: A review // *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (AI2SD'2023)*. Cham : Springer, 2024. Vol. 930. p. 262–271. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54318-0_22.
7. Nguyen Q. D., Tran V. T., Pham Q. D. et al. Design brushless DC motor control by using proportional-integral strategy for a smart storage cabinet system // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2023. Vol. 14, no. 2. P. 708–718. <https://doi.org/10.11591/ijped.v14.i2.pp708-718>.
8. Akhtar A., Muthuramalingam T., Elsheikh A. H. et al. A review on artificial intelligence based control techniques on controlling BLDC motor measures // *AIP Conference Proceedings*, 2023. Vol. 2788. <https://doi.org/10.1063/5.0148685>.
9. Premkumar K., Manikandan B. V. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based speed controller for brushless DC motor // *Neurocomputing*. 2014. Vol. 138. P. 260–270.

References

1. Deepak M., Arul David R., Verma R. et al. A review of BLDC motor: State of art, advanced control techniques, and applications. *IEEE Access*. 2022;10:1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011>.
2. Kumarasamy V., Valluvan K. R., Chandrasekaran G. et al. A review of integer order PID and fractional order PID controllers using optimization techniques for speed control of brushless DC motor drive. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2023;14:1139–1150. <https://doi.org/10.1007/s13198-023-01952-x>.
3. Nisha R., Gnana Sheela K. Review of PV fed water pumping systems using BLDC Motor. *Materials Today: Proceedings*. 2020;24(3):1874–1881. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.612>.
4. Andrioiu D. A., Gaitan V. G. Finding fault types of BLDC motors within UAVs using machine learning techniques. *Heliyon*. 2024;10(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30251>.
5. Du J., Sun Y., Zhao J. et al. Loss research and thermal analysis of BLDC hollow-cup motor under reactor suppression. *Applied Sciences*. 2025;15(3). <https://doi.org/10.3390/app15031523>.
6. Machhour Z., Mrabet M. E., Mekrini Z. et al. Comparative study between DTC and FOC control strategies applied to the BLDC motor: A review. In: *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (AI2SD'2023)*. Cham: Springer; 2024. Vol. 930. p. 262–271. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54318-0_22.
7. Nguyen Q. D., Tran V. T., Pham Q. D. et al. Design brushless DC motor control by using proportional-integral strategy for a smart storage cabinet system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2023;14(2):708–718. <https://doi.org/10.11591/ijped.v14.i2.pp708-718>.
8. Akhtar A., Muthuramalingam T., Elsheikh A. H. et al. A review on artificial intelligence based control techniques on controlling BLDC motor measures. In: *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2788. <https://doi.org/10.1063/5.0148685>.
9. Premkumar K., Manikandan B. V. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based speed controller for brushless DC motor. *Neurocomputing*. 2014;138:260–270.

10. Carev V., Roháč J., Tkachenko S. et al. Modernization of BLDC motors for UAVs // *International Review of Aerospace Engineering (IREASE)*, 2023. Vol. 16, no. 1. P. 29–38. <https://doi.org/10.15866/irease.v16i1.23087>.
11. Carev V., Roháč J., Tkachenko S. et al. The electronic switch of windings of a standard BLDC motor // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 21. P. 11096. <https://doi.org/10.3390/app122111096>.
12. Assoun I., Idkhajine L., Nahid-Mobarakeh B. et al. Wide-speed range sensorless control of five-phase PMSM drive under healthy and open phase fault conditions for aerospace applications // *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 279. <https://doi.org/10.3390/en16010279>.
13. Tapre M., Karampuri R. Design and comparison of five-phase induction motors with different dimensions for heavy duty electric vehicles // *2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*. 2023. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SeFeT57834.2023.10245615>.
14. Kurt E., Arabul A. Y., Arabul F. K. et al. A multi-phase brushless direct current motor design and its implementation in medium-altitude long-endurance unmanned aerial vehicles // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 24. P. 11550–11563. <https://doi.org/10.3390/app142411550>.
15. Кривогузова А. С., Ткаченко С. Н., Шпилевой А. А. Влияние параметров обмоток и источника питания на пусковые характеристики модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока // *Russian Technological Journal*. 2025. Т. 13, № 4. С. 69–77. <http://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-69-77>.
16. Raeisi Hasanhendoei G. H., Afjei E., Naseri M. et al. Automatic and real time phase advancing in BLDC motor by employing an electronic governor for a desired speed-torque/angle profile // *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2023. Vol. 4. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100111>.
17. Stamova I., Stamov G. Integral manifolds for impulsive differential problems with applications. Academic Press, 2025. 348 p.
18. Abdulkareem H., Alsaif O. I., Younis L. et al. Performance optimization of BLDC motor control using sand cat swarm algorithm and linear quadratic regulator // *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2025. Vol. 6, no 1. P. 306–314. <https://doi.org/10.18196/jrc.v6i1.24958>.
19. Akram S., Aljanabi M. A comprehensive investigation of brushless direct current (BLDC) motors: Current state, advanced control strategies, and utilization systems // *Salud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias*. 2024. Vol. 3. P. 865. <https://doi.org/10.56294/sctconf2024865>.
20. Dakheel H. S., Abdullah Z. B., Shneen S. W. Advanced optimal GA-PID controller for BLDC motor // *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics (BEEI)*. 2023. Vol. 12, no. 4. P. 2077–2086. <https://doi.org/10.11591/eei.v12i4.4649>.
10. Carev V., Roháč J., Tkachenko S. et al. Modernization of BLDC Motors for UAVs. *International Review of Aerospace Engineering (IREASE)*. 2023;16(1):29–38. <https://doi.org/10.15866/irease.v16i1.23087>.
11. Carev V., Roháč J., Tkachenko S. et al. The electronic switch of windings of a standard BLDC motor. *Applied Sciences*. 2022;12(21):11096. <https://doi.org/10.3390/app122111096>.
12. Assoun I., Idkhajine L., Nahid-Mobarakeh B. et al. Wide-speed range sensorless control of five-phase PMSM drive under healthy and open phase fault conditions for aerospace applications. *Energies*. 2023;16(1):279. <https://doi.org/10.3390/en16010279>.
13. Tapre M., Karampuri R. Design and comparison of five-phase induction motors with different dimensions for heavy duty electric vehicles. In: *2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*. 2023. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SeFeT57834.2023.10245615>.
14. Kurt E., Arabul A. Y., Arabul F. K. et al. A multi-phase brushless direct current motor design and its implementation in medium-altitude long-endurance unmanned aerial vehicles. *Applied Sciences*. 2024;14(24):11550–11563. <https://doi.org/10.3390/app142411550>.
15. Krivoguzova A. S., Tkachenko S. N., Shpilevoy A. A. Effect of winding and power supply parameters on the starting characteristics of an upgraded brushless DC motor. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):69–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-69-77>. (In Russ.).
16. Raeisi Hasanhendoei G. H., Afjei E., Naseri M. et al. Automatic and real time phase advancing in BLDC motor by employing an electronic governor for a desired speed-torque/angle profile. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2023;4. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100111>.
17. Stamova I., Stamov G. Integral manifolds for impulsive differential problems with applications. Academic Press; 2025. 348 p.
18. Abdulkareem H., Alsaif O. I., Younis L. et al. Performance optimization of BLDC motor control using sand cat swarm algorithm and linear quadratic regulator. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2025;6(1):306–314. <https://doi.org/10.18196/jrc.v6i1.24958>.
19. Akram S., Aljanabi M. A comprehensive investigation of brushless direct current (BLDC) motors: Current state, advanced control strategies, and utilization systems. *Salud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias*. 2024;3:865. <https://doi.org/10.56294/sctconf2024865>.
20. Dakheel H. S., Abdullah Z. B., Shneen S. W. Advanced optimal GA-PID controller for BLDC motor. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics (BEEI)*. 2023;12(4):2077–2086. <https://doi.org/10.11591/eei.v12i4.4649>.

21. Gujja M. M., Ishak D., Hamidi M. N. et al. Performance comparison and analysis of four- and six-switch inverter controls of BLDC motor employing deep learning // *Jurnal Kejuruteraan*. 2024. Vol. 36, no. 4. P. 1409–1422. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(4\)-07](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(4)-07).
21. Gujja M. M., Ishak D., Hamidi M. N. et al. Performance comparison and analysis of four- and six-switch inverter controls of BLDC motor employing deep learning. *Jurnal Kejuruteraan*. 2024;36(4):1409–1422. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(4\)-07](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(4)-07).

Информация об авторах

С. Н. Ткаченко – кандидат технических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0002-4708-6556>,
tkasergey@yandex.ru✉

А. С. Кривогузова – аспирант;

<https://orcid.org/0000-0002-4090-662X>,
krivoguzova99@bk.ru

А. А. Шпилевой – кандидат физико-математических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0003-2610-6551>,
ashpilevoi@kantiana.ru

About the authors

S. N. Tkachenko – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;

<https://orcid.org/0000-0002-4708-6556>,
tkasergey@yandex.ru✉

A. S. Krivoguzova – Postgraduate;

<https://orcid.org/0000-0002-4090-662X>,
krivoguzova99@bk.ru

A. A. Shpilevoi – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;

<https://orcid.org/0000-0003-2610-6551>,
ashpilevoi@kantiana.ru

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания <https://www.vestcyber.ru> и в базе данных Научной электронной библиотеки на сайте elibrary.ru, сведения о публикуемых материалах включаются в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес учредителя и издателя:
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. +7 (3462) 76-29-29

Дата опубликования 18.12.2025.