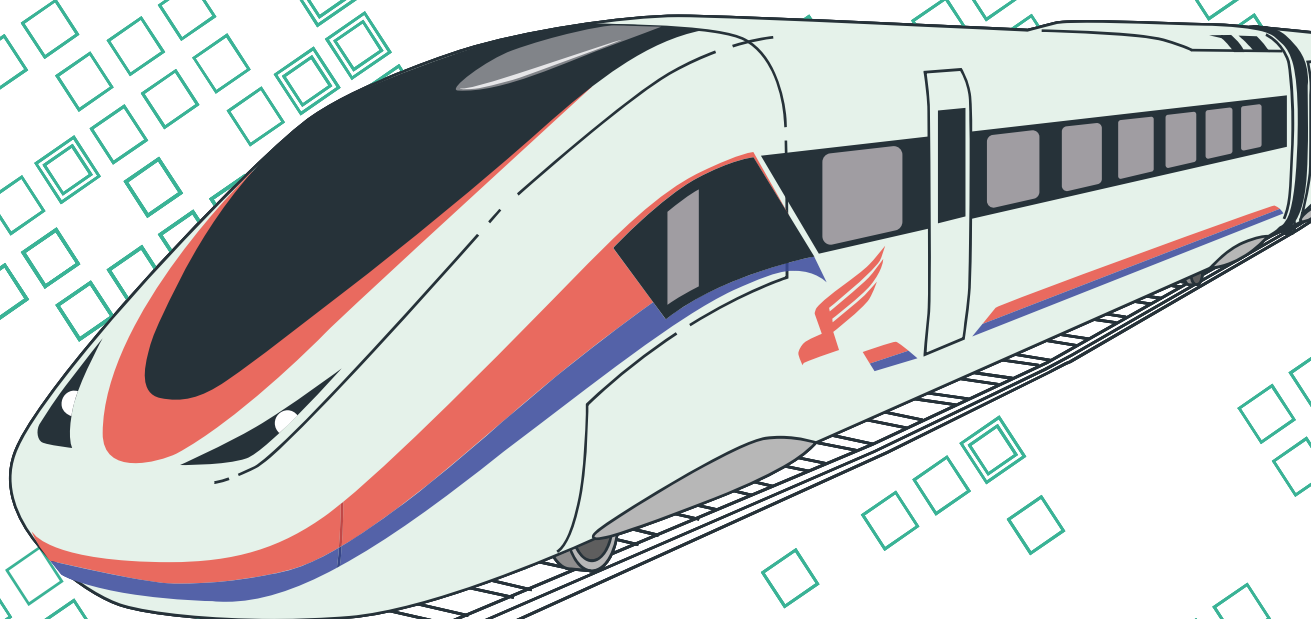


Интеллектуальные технологии на транспорте

Intellectual Technologies
on Transport



Выпуск 3
2025

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ
(сетевой электронный научный журнал)
Выпуск 3 (43), 2025
ISSN 2413-2527

Сетевой электронный научный журнал, свободно распространяемый через Интернет. Публикуются статьи на русском и английском языках с результатами исследований и практических достижений в области интеллектуальных технологий и сопутствующих им научных исследований. Журнал основан в 2015 году.

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Центр РИОР» по договору № ЭА78751 от 28.12.2024

Адрес редакции:

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
e-mail: itt-pgups@yandex.ru
Телефон: +7 (812) 457-86-06

Сетевое издание «Интеллектуальные технологии на транспорте (сетевой электронный научный журнал), Intellectual Technologies on Transport» зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство Эл № ФС77-61707 от 07.05.2015.

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Выпуски журнала доступны на сайте <http://itt-pgups.ru>

Периодичность выхода — 4 номера в год.

Хомоненко А. Д., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ — главный редактор

Божко Л. М., д. э. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ — заместитель главного редактора

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Сопредседатели редакционного совета:

Валинский О. С., к. т. н., ректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Чаркин Е. И., зам. гендиректора по ИТ ОАО «РЖД», Москва, РФ

Ададунов С. Е., д. т. н., проф., ВНИИЖТ, Москва, РФ
Дудин А. Н., д. ф.-м. н., проф., БГУ, Минск, Беларусь
Корниенко А. А., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Макаренко С. И., д. т. н., доц., ПАО «Интелтех», С.-Петербург, РФ
Меркурьев Ю. А., Dr. Habil., проф., член Латвийской АН, РТУ, Рига, Латвия
Титова Т. С., д. т. н., проф., первый проректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Александрова Е. Б., д. т. н., проф., СПбПУ, С.-Петербург, РФ
Басыров А. Г., д. т. н., проф., ВКА, С.-Петербург, РФ
Баталов Д. И., к. т. н., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Безродный Б. Ф., д. т. н., проф., НИИАС, Москва, РФ
Благовещенская Е. А., д. ф.-м. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

Бубнов В. П., д. т. н., проф., С.-Петербург, РФ
Булавский П. Е., д. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Василенко М. Н., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Глухов А. П., д. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Гуда А. Н., д. т. н., проф., РГУПС, Ростов-на-Дону, РФ
Ермаков С. Г., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Заборовский В. С., д. т. н., проф., СПбПУ, С.-Петербург, РФ
Канаев А. К., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Котенко А. Г., д. т. н., проф., ВНИИЖТ, Москва, РФ
Куренков П. В., д. э. н., к. т. н., проф., РУТ (МИИТ), Москва, РФ
Лецкий Э. К., д. т. н., проф., РУТ (МИИТ), Москва, РФ
Наседкин О. А., к. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Никитин А. Б., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Новиков Е. А., д. т. н., доц., ВКА, С.-Петербург, РФ
Охтилев М. Ю., д. т. н., проф., НИО ЦИТ «Петрокомета», С.-Петербург, РФ
Привалов А. А., д. воен. н., проф., Академия войск национальной гвардии, С.-Петербург, РФ
Соколов Б. В., д. т. н., проф., СПб ФИЦ РАН, С.-Петербург, РФ
Таранцев А. А., д. т. н., проф., ИПТ РАН, С.-Петербург, РФ
Утепбергенов И. Т., д. т. н., проф., АУЭС, Алматы, Казахстан
Фазылов Ш. Х., д. т. н., проф., НИИ развития цифровых технологий и ИИ, Ташкент, Узбекистан
Хабаров В. И., д. т. н., проф., СГУПС, Новосибирск, РФ
Ходаковский В. А., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Чехонин К. А., д. ф.-м. н., доц., ХВИЦ ДВО РАН, Хабаровск, РФ

Intellectual Technologies on Transport
(Network electronic scientific journal)
Issue 3 (43), 2025
ISSN 2413-2527

Network electronic scientific journal, open access.
It publishes articles in Russian and English with the results of research and practical achievements in the field of intelligent technologies and associated research.
Founded in 2015.

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University"

Publisher

Limited Liability Company "Publishing Center RIOR", under contract N ЭА78751, 28.12.2024

Frequency of release — 4 issues per year.

Editorial address:

190031, St. Petersburg, Moskovsky ave., 9
e-mail: itt-pgups@yandex.ru
Phone: +7 812 457 86 06

The online journal "Intellectual Technologies on Transport" is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies, and Mass Media.

El No. FS77-61707 Testimony from May 7, 2015.

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI).

Issues of the magazine are available at <http://itt-pgups.ru>

Khomonenko A. D., Dr. Sci. in Engineering, Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia — Editor-in-Chief

Bozhko L. M., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia — Deputy Editor-in-Chief

EDITORIAL COUNCIL MEMBERS

Co-chairs of the Editorial Council:

Valinsky O. S., PhD in Engineering, rector of PSTU, St. Petersburg, Russia

Charkin E. I., CIO of JSC "Russian Railways", Moscow, Russia

Adadurov S. E., Prof., VNIIZHT, Moscow, Russia

Dudin A. N., Prof., BSU, Minsk, Belarus

Kornienko A. A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Makarenko S. I., As. Prof., Inteltech, St. Petersburg, Russia

Merkuryev Yu. A., Prof., Academician of the Latvian Academy of Sciences, RTU, Riga, Latvia

Titova T. S., Prof., First Vice-Rector PSTU, St. Petersburg, Russia

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Aleksandrova E. B., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia

Basyrov A. G., Prof., MSA, St. Petersburg, Russia

Batalov D. I., PhD in Engineering, PSTU, St. Petersburg, Russia

Bezrodny B. F., Prof., NIIAS, Moscow, Russia

Blagoveshchenskaya E. A., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Bubnov V. P., Prof., St. Petersburg, Russia

Bulavsky P. E., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Vasilenko M. N., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Glukhov A. P., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Guda A. N., Prof., RSTU, Rostov-on-Don, Russia

Ermakov S. G., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Zaborovsky V. S., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia

Kanaev A. K., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Kotenko A. G., Prof., VNIIZHT, Moscow, Russia

Kurenkov P. V., Prof., RUT (MIIT), Moscow, Russia

Letsky E. K., Prof., RUT (MIIT), Moscow, Russia

Nasedkin O. A., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Nikitin A. B., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Novikov E. A., As. Prof., MSA, St. Petersburg, Russia

Okhtilev M. Yu., Prof., JSC "Petrokometa", St. Petersburg, Russia

Privalov A. A., Prof., Academy of the National Guard Troops, St. Petersburg, Russia

Sokolov B. V., Prof., SPC RAS, St. Petersburg, Russia

Tarantsev A. A., Prof., IPT RAS, St. Petersburg, Russia

Uteperbergenov I. T., Prof., AUPET, Almaty, Kazakhstan

Fazilov Sh. X., Prof., AIRI, Tashkent, Uzbekistan

Khabarov V. I., Prof., STU, Novosibirsk, Russia

Khodakovskiy V. A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Chekhnin K. A., Prof., Khabarovsk FRC RAS, Khabarovsk, Russia

Содержание

Информационная безопасность и защита данных

Глухарев М. Л., Данилова П. И.

Анализ современных методов криптографического шифрования и проектирование менеджера паролей с усиленной защитой учетных данных5

Корниенко С. В., Минеева Д. Д.

Противодействие фейковым новостям в современном мире15

Искусственный интеллект и транспортные системы

Барановский А. М., Бобриков Д. А.

Многоагентная архитектура для интеллектуальной диагностики подвижного состава: концепция и прототипирование.25

Шабakov Е. И., Куренков Н. О.

Метод оценки качества изображений, формируемых дистанционными средствами контроля состояния подвижного состава и железнодорожных путей33

Математическое и программное обеспечение вычислительных комплексов и сетей

Битченков Д. И., Злобина М. С., Ермаков С. Г.

Ключевые проблемы внедрения ETL/ELT-процессов и методы их преодоления.41

Забродин А. В., Сабиров Н.

Особенности применения партиционирования по дискретным значениям в СУБД PostgreSQL.....49

Математическое моделирование и системный анализ

Мануйлов Ю. С., Толоконников А. В.

Линеаризация модели движения многосвязного динамического объекта методом псевдокоординатной линеаризации.58

Сергеева Д. В., Баталов Д. И.

Анализ математических подходов к моделированию ОПОП для кадрового обеспечения цифровой трансформации транспорта68

Фоменко Ю. С., Хомоненко А. Д.

Позиционирование подвижного состава на основе алгоритмов нечеткой логики для определения аномалий движения77

Contents

Information Security and Data Protection

Glukharev M. L., Danilova P. I.

Analysis of Modern Cryptographic Encryption Methods and Design of a Password Manager
with Enhanced Credential Protection13

Kornienko S. V., Mineeva D. D.

Countering Fake News in the Modern World23

Artificial Intelligence and Transport Systems

Baranovsky A. M., Bobrikov D. A.

Multi-Agent Architecture for Intelligent Rolling Stock Diagnostics: Concept and Prototyping30

Shabakov E. I., Kurenkov N. O.

Method for Assessing the Quality of Images Generated by Remote Monitoring Devices
for Rolling Stock and Railway Tracks40

Mathematical and Software Support for Computer Complexes and Networks

Bitchenkov D. I., Zlobina M. S., Ermakov S. G.

Key Challenges of Implementing ETL/ELT Processes and Methods to Overcome Them.46

Zabrodin A. V., Sabirov N.

Features of List Partitioning Application in the PostgreSQL DBMS56

Mathematical Modelling and System Analysis

Manuilov Y. S., Tolokonnikov A. V.

Linearization of the Motion Model of a Multi-Connected Dynamic Object
by Pseudo-Coordinate Linearization.67

Sergeeva D. V., Batalov D. I.

Mathematical Approaches to Modelling Basic Professional Education Programmes
for Personnel Support of Transport Digital Transformation75

Fomenko Yu. S., Khomonenko A. D.

Positioning of Rolling Stock Based on Fuzzy Logic Algorithms for Detecting
Transport Movement Anomalies.85

УДК 004.056.5

Анализ современных методов криптографического шифрования и проектирование менеджера паролей с усиленной защитой учетных данных

Глухарев Михаил Леонидович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информатика и информационная безопасность». Научные интересы: информационная безопасность, криптографические методы защиты данных, проектирование защищенных программных систем, технологии защиты персональных данных. E-mail: mlgluharev@yandex.ru

Данилова Полина Ивановна — студент 4-го курса направления 10.05.03 «Информационная безопасность автоматизированных систем». Научные интересы: криптография, разработка приложений в сфере информационной безопасности, реализация защищенных пользовательских интерфейсов и алгоритмов шифрования. E-mail: polina_2004.11@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Глухарев М. Л., Данилова П. И. Анализ современных методов криптографического шифрования и проектирование менеджера паролей с усиленной защитой учетных данных // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 5–14. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-5-14

Аннотация. Представлено исследование о проектировании менеджера паролей с усиленной криптографической защитой для локального хранения учетных данных. **Цель:** создание программного решения, реализующего безопасную генерацию, шифрование и хранение паролей с использованием современных алгоритмов. **Методы:** применены современные криптографические подходы, включая симметричное шифрование (AES-GCM), хеш-функции (SHA-256), а также алгоритм PBKDF2 для генерации ключей на основе мастер-пароля и соли. **Результаты:** включают реализацию программного комплекса на Java, обеспечивающего настройку политики безопасности, защиту от атак перебором и словарных атак, а также проверку целостности данных. Разработан криптографический модуль, соответствующий требованиям NIST и ГОСТ. **Практическая значимость:** заключается в возможности применения программного продукта в организациях, в которых необходима локальная защита конфиденциальных данных без использования облачных технологий. Решение может использоваться для повышения уровня информационной безопасности в малом бизнесе, образовательных учреждениях и в среде разработчиков. **Обсуждение:** подчеркиваются преимущества автономной архитектуры, открытого кода и перспективы дальнейшего развития, включая расширение функционала и адаптацию для корпоративных нужд.

Ключевые слова: менеджер паролей, криптографическая защита, AES-GCM, PBKDF2, SHA-256, хранение учетных данных, шифрование, информационная безопасность, Java

2.3.6 — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

Введение

С развитием цифровых технологий значительно возросло количество сервисов, требующих регистрации и хранения учетных данных. Пользователи зачастую используют слабые пароли или один и тот же пароль на различных платформах, что приводит к риску утечки данных. Согласно отчету Positive Technologies [1], более половины (52 %) успешных атак на организации во втором полугодии 2024 года закончились утечками данных. Наиболее часто жертвами утечек становились государственные учреждения (13 %), промышленность (10 %), ИТ-компании (10 %), финансовые организации (8 %) и медицинские учреждения (7 %).

Менеджеры паролей являются важным инструментом для обеспечения защиты от несанкционированного доступа и криптостойкости зашифрованных данных. В статье представлена разработка менеджера паролей с поддержкой криптографической защиты, реализованного на языке Java. Программа включает в себя функционал генерации паролей, управления политиками безопасности и шифрования данных с использованием алгоритмов AES-256 и PBKDF2.

Анализ существующих решений и постановка задачи

Существует значительное количество программных решений, предназначенных для хранения и управления паролями, среди которых наиболее популярными являются KeePass [2], Bitwarden [3], LastPass [4] и другие. Эти системы предоставляют пользователям возможность централизованного хранения учетных данных, автоматической генерации паролей, а также удобные средства для передачи и синхронизации информации между различными устройствами и платформами. Вместе с тем анализ существующих программных средств выявляет ряд важных ограничений, оказывающих влияние на уровень доверия к таким решениям и их применимость в контексте задач, связанных с повышенными требованиями к безопасности.

Во-первых, значительная часть широко распространенных менеджеров паролей разрабатывается как проприетарное программное обеспечение, что

не дает возможности специалистам по информационной безопасности провести анализ шифрования данных и убедиться в отсутствии уязвимостей, ошибок или закладок.

Во-вторых, большинство современных сервисов ориентированы на облачную модель хранения: пользовательские данные сохраняются на внешних серверах поставщика услуги, даже если они предварительно зашифрованы. Такая архитектура порождает дополнительные риски: в случае компрометации серверной инфраструктуры, утечки административных ключей или нарушения политики безопасности со стороны персонала возможно получение злоумышленником доступа ко всем хранилищам пользователей. Подобные инциденты уже имели место в реальной практике, например в случае взлома LastPass в 2022 году [5], что подтверждает уязвимость облачных решений перед целенаправленными атаками.

Кроме того, большинство программных решений не позволяют пользователю гибко настраивать политику генерации паролей. Такой подход может быть неприемлем в образовательной, исследовательской или корпоративной среде, где важно обеспечить не только безопасность, но и возможность контроля формирования данных.

Учитывая изложенное, целесообразным является создание локального менеджера паролей с открытой архитектурой, реализующего принципы автономной защиты и криптографической стойкости алгоритмов шифрования. В данном случае пользователю не предоставляется полный контроль над процессом обработки данных, но доступность открытого кода обеспечивает прозрачность и возможность проверки безопасности на всех этапах — от генерации ключа на основе мастер-пароля до анализа алгоритма шифрования и модификации кода.

В работе представлена реализация данного решения на языке Java, ориентированная на применение современных криптографических стандартов и обеспечение высокого уровня безопасности при локальной работе без необходимости обращения к внешним серверам.

Функционал программы

Разработанный менеджер паролей позволяет создавать и безопасно хранить учетные данные с учетом заданной политики безопасности (рис. 1).

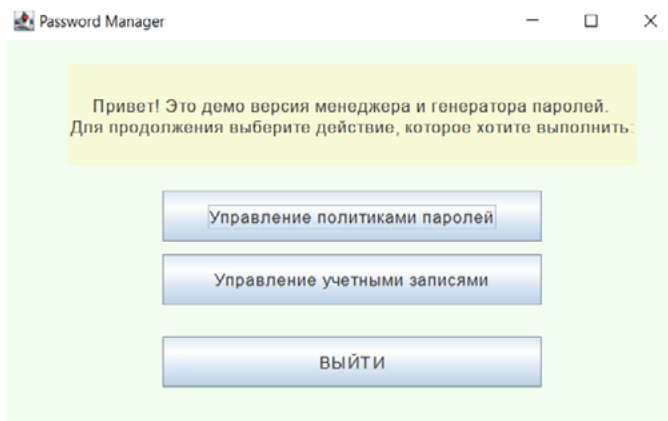


Рис. 1. Главный экран программы

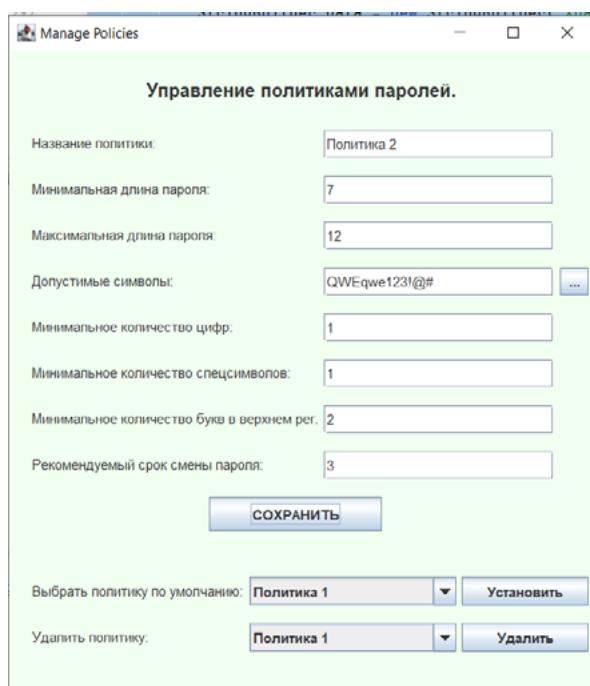
Генерация паролей происходит автоматически на основе заранее определенных требований: параметры длины (минимальной и максимальной), допустимого набора символов, а также требований к числу цифр, специальных символов и символов верхнего регистра. Пользователь может настраивать

эти правила, создавать и удалять их, а также выбирать одну из политик в качестве основной (рис. 2).

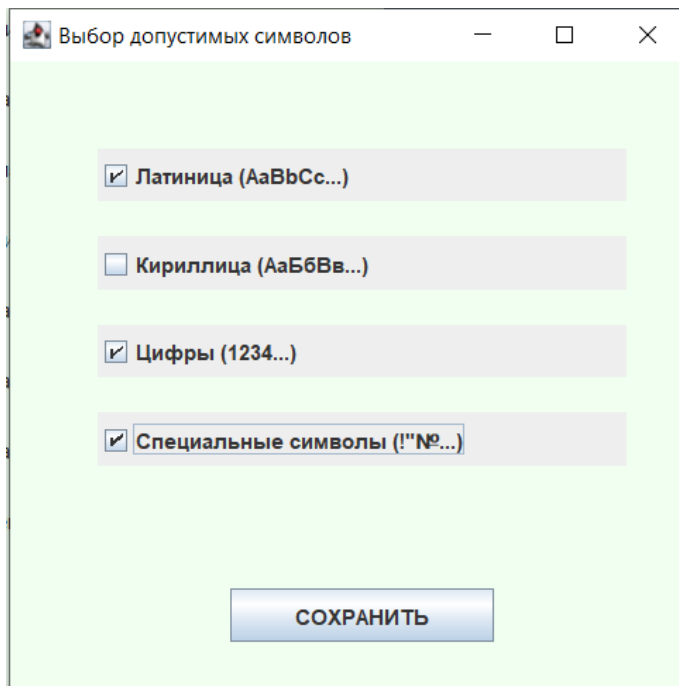
Все учетные данные, включая логины, пароли и дополнительную информацию (например, описание сервиса, дату добавления и т. п.) после сохранения (рис. 3), подвергаются обязательному шифрованию перед сохранением в отдельном файле.

В качестве криптографической основы используется симметричный алгоритм AES (Advanced Encryption Standard) в режиме GCM (Galois/Counter Mode), который гарантирует не только конфиденциальность, но и целостность хранимой информации. Ключ шифрования формируется с применением функции PBKDF2 (Password-Based Key Derivation Function 2) на основе введенного пользователем мастер-пароля и случайной последовательности байтов, что обеспечивает стойкость к атакам перебором и словарным атакам.

Доступ к зашифрованным данным возможен только после ввода правильного мастер-пароля (рис. 4). При этом проверка пароля осуществляется путем сравнения его хэш-значения с ранее сохраненным эталонным значением, сгенерированным по алгоритму SHA-256.



а



б

Рис. 2. Управление политиками паролей:
а — настройка общих правил; б — выбор допустимых символов

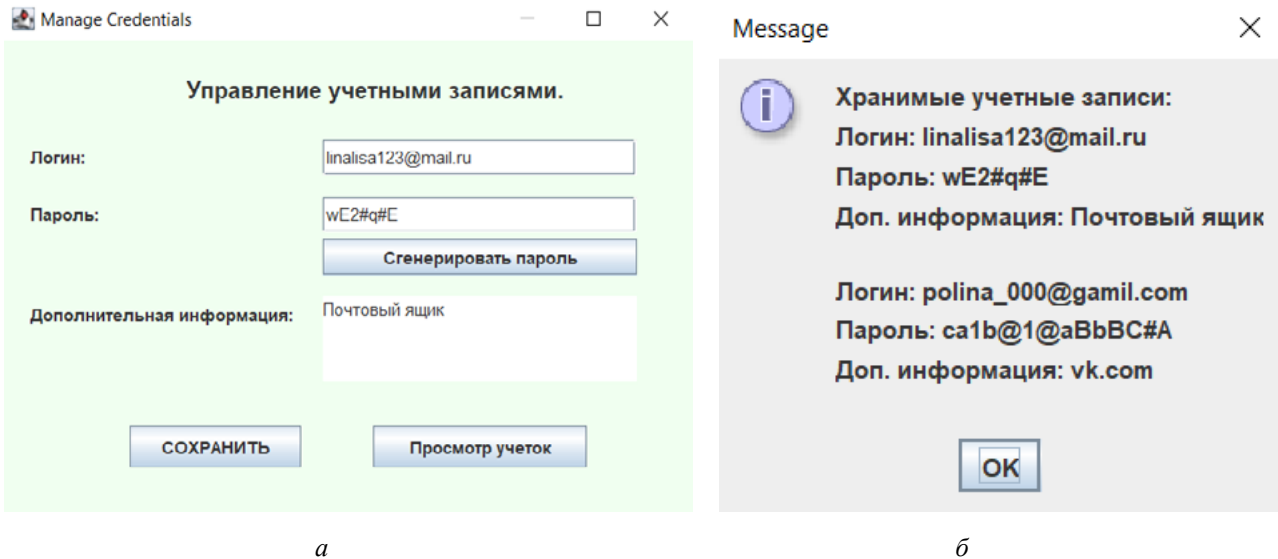


Рис. 3. Управление учетными записями
 а — сохранение новых записей; б — просмотр существующих учетных записей

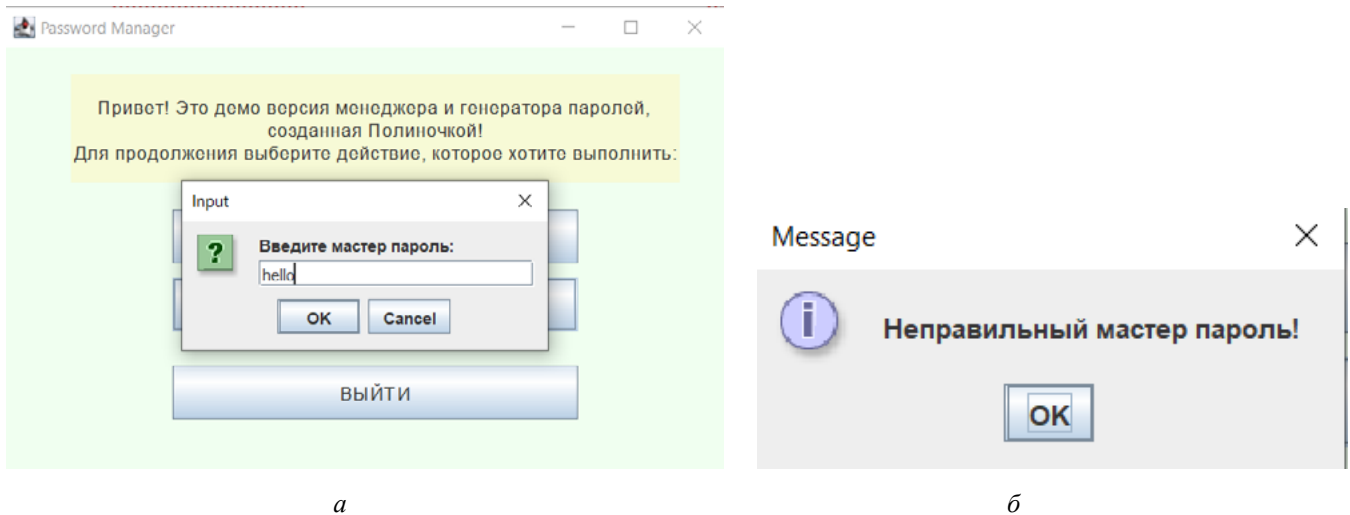


Рис. 4. Ввод мастер-пароля:
 а — ввод пароля; б — сообщение о неправильно введенном пароле

Такой подход исключает возможность несанкционированного доступа даже в случае получения доступа к файлу с хранимыми данными.

Общая схема криптографической защиты данных

Современные криптографические системы строятся с учетом трех фундаментальных угроз информационной безопасности: утечка конфиденциальной информации, нарушение целостности и доступности данных. Нарушение конфиденциальности выражается в получении злоумышленником доступа к содержанию передаваемых или хранимых сообщений, нарушение целостности — в не-

санкционированном и незаметном для получателя изменении данных, нарушение доступности — действие, которое делает невозможным или затрудняет доступ к ресурсам информационной системы.

Дешифрование сообщения злоумышленником возможно в случае вычисления секретного ключа либо при обнаружении алгоритма, функционально эквивалентного используемому в системе и не требующего знания ключа. Таким образом, разработка криптографически устойчивых систем основывается на двух характеристиках: криптостойкости — способности защищать сообщения от расшифровки без знания ключа и имитостойко-

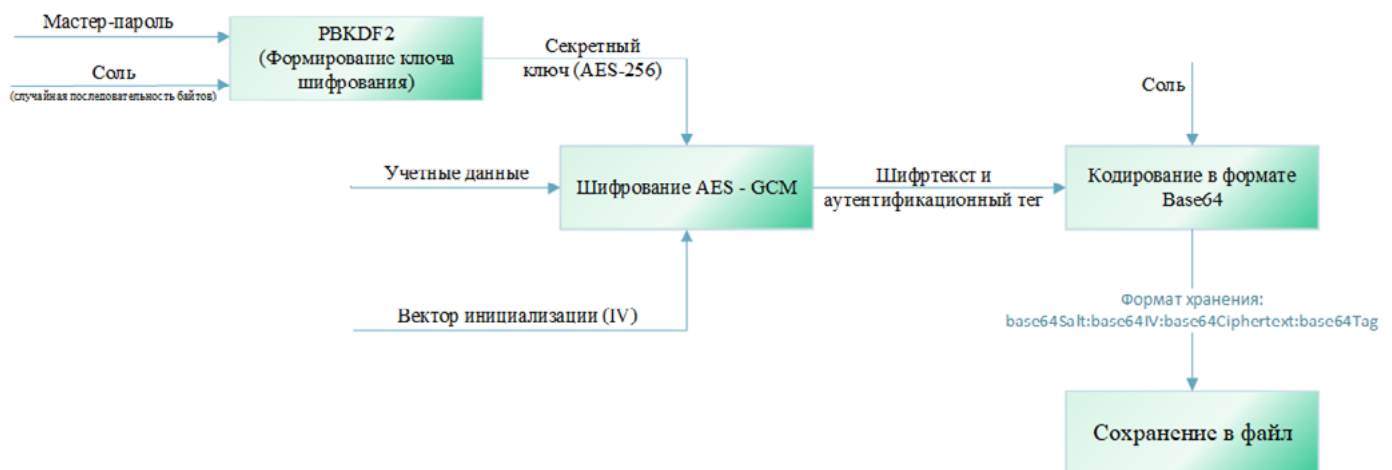


Рис. 5. Общая схема процесса криптографической защиты учетных данных

сти — устойчивости к попыткам генерации ложных данных, внешне идентичных подлинным [6].

Криптографическая защита учетных данных в разработанном программном обеспечении реализуется посредством применения симметричных алгоритмов шифрования и стандартных методов усиления паролей. Используемые подходы соответствуют актуальным требованиям международных и российских нормативных документов в области защиты информации, в том числе рекомендациям NIST [7] и ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002—2021 [8].

На рис. 5 представлена общая схема криптографической защиты данных, начиная от ввода мастер-пароля и заканчивая формированием итогового файла с зашифрованной информацией.

Вначале мастер-пароль пользователя и случайно сгенерированная последовательность битов (соль) поступают на вход алгоритма PBKDF2, описанного в стандарте RFC 8018 [9], где на основе алгоритма HMAC-SHA256 выполняется итеративное хеширование. Это позволяет значительно повысить вычислительную сложность атаки полным перебором [6]. Результатом выполнения PBKDF2 является криптографически стойкий ключ длиной 256 бит, используемый в последующем симметричном шифровании.

В качестве алгоритма шифрования был выбран стандарт AES в режиме GCM. Помимо шифрования записей, режим GCM обеспечивает аутентификацию данных за счет формирования специального аутентификационного тега.

В результате работы системы на выходе модуля шифрования формируются зашифрованный текст и тег аутентификации, которые вместе с вектором инициализации и солью преобразуются в формат Base64 и сохраняются в файл. Такая структура хранения данных обеспечивает криптографическую стойкость, не усложняя при этом процесс обращения к данным.

Генерация ключа шифрования: применение PBKDF2 с HMAC-SHA256

Современные алгоритмы блочного шифрования, включая AES, используют ключ фиксированной длины — 128, 192 или 256 бит. Из него формируются подключи, используемые на каждом раунде. Существуют специализированные криптоаналитические атаки, которые нацелены именно на алгоритмы генерации подключей. В связи с этим одним из ключевых требований к конструкции блочных шифров является наличие надежного алгоритма (или процедуры) расширения ключа. Усложнение алгоритма формирования расширенного ключа может повысить общую стойкость шифра [10]. Для этого было принято решение использовать функцию PBKDF2. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 6.

Механизм, представленный на рис. 6, реализует процесс усложнения пароля на основе итеративной хеш-функции и логической операции «исключающее или». На первом этапе вводимый пользователем мастер-пароль преобразуется в битовую последовательность и подвергается хешированию

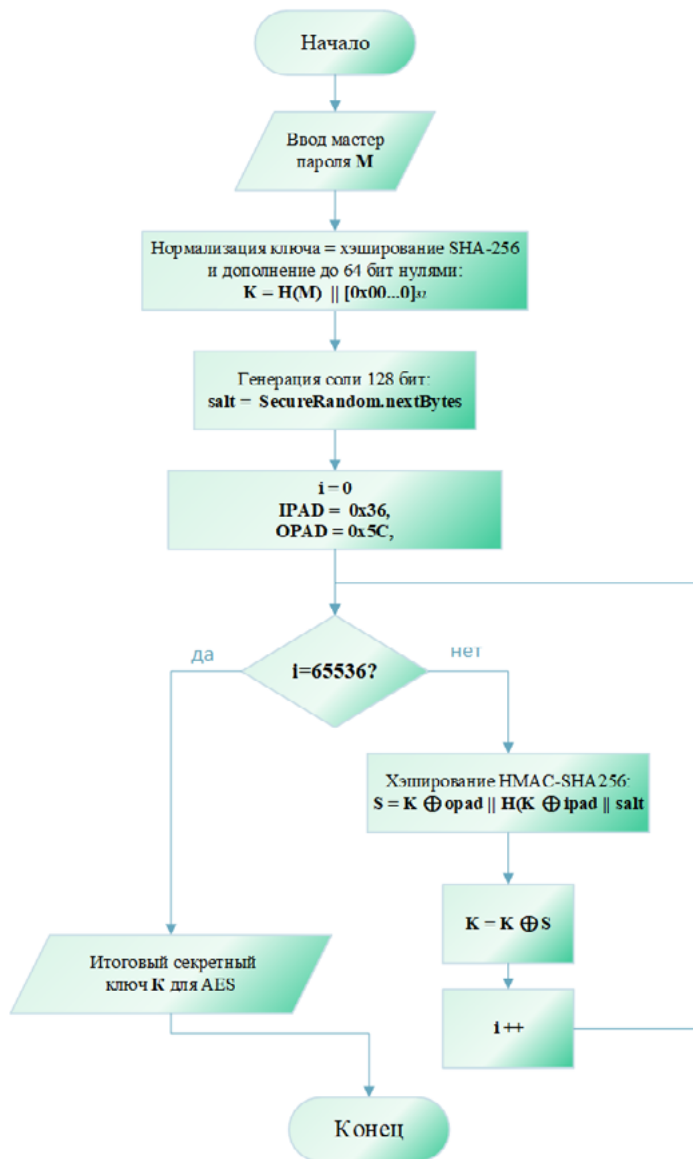


Рис. 6. Блок-схема алгоритма формирования расширенного криптографического ключа

функцией SHA-256 [6]. Далее формируется соль — случайная строка длиной 128 бит, уникальная для каждой сохраненной записи, и добавляется к полученному хешу.

На следующем этапе используется механизм HMAC (Hash-Based Message Authentication Code), который объединяет мастер-пароль и соль, формируя начальное значение хеша. Далее выполняется последовательность итераций, где каждая итерация HMAC принимает в качестве входных значений результат вычислений предыдущего этапа. Полученные на каждой итерации хеш-значения накапливаются с помощью побитовой операции XOR, что обеспечивает постепенное усложне-

ние выходного ключа и снижает возможность его предсказания.

Чем больше итераций задано, тем дольше будет длиться процесс генерации ключа, что создает вычислительные сложности для атакующего, пытающегося перебрать возможные значения пароля. Такая схема эффективно замедляет атаки грубой силы (brute-force) и делает неэффективными словарные атаки, особенно в условиях, когда ресурсы злоумышленника ограничены во времени или мощности.

Итоговым результатом работы алгоритма становится ключ длиной 256 бит, применяемый в блочном алгоритме AES. Важно отметить, что каждая новая сохраняемая учетная запись будет иметь новую последовательность битов в соли. Это означает, что даже если два пользователя используют одинаковые пароли, их хеши будут разными из-за уникальной соли. Это делает атаки с использованием радужных таблиц (rainbow tables) менее эффективными, так как злоумышленник не может заранее подготовить таблицы хешей [11].

Применение алгоритма шифрования AES в режиме GCM

AES-GCM — вариант шифра AES в режиме гаммирования с аутентификацией Галуа. Алгоритм генерирует аутентификационный тег на основе открытого текста, дополнительных аутентифицированных данных и ключа аутентификации [12].

Подробный порядок выполнения операций отображен на рис. 7.

На первом этапе генерируется вектор инициализации фиксированной длины (96 бит), который используется в качестве начального значения для счетчика J0. Далее исходные данные разбиваются на блоки по 128 бит, каждый из которых подвергается шифрованию при помощи алгоритма AES с ключом длиной 256 бит. Полученные зашифрованные блоки объединяются с блоками открытого текста путем выполнения побитовой операции XOR.

Параллельно с этим осуществляется вычисление тега аутентификации. Для этого используется функция GHASH, использующая умножение в

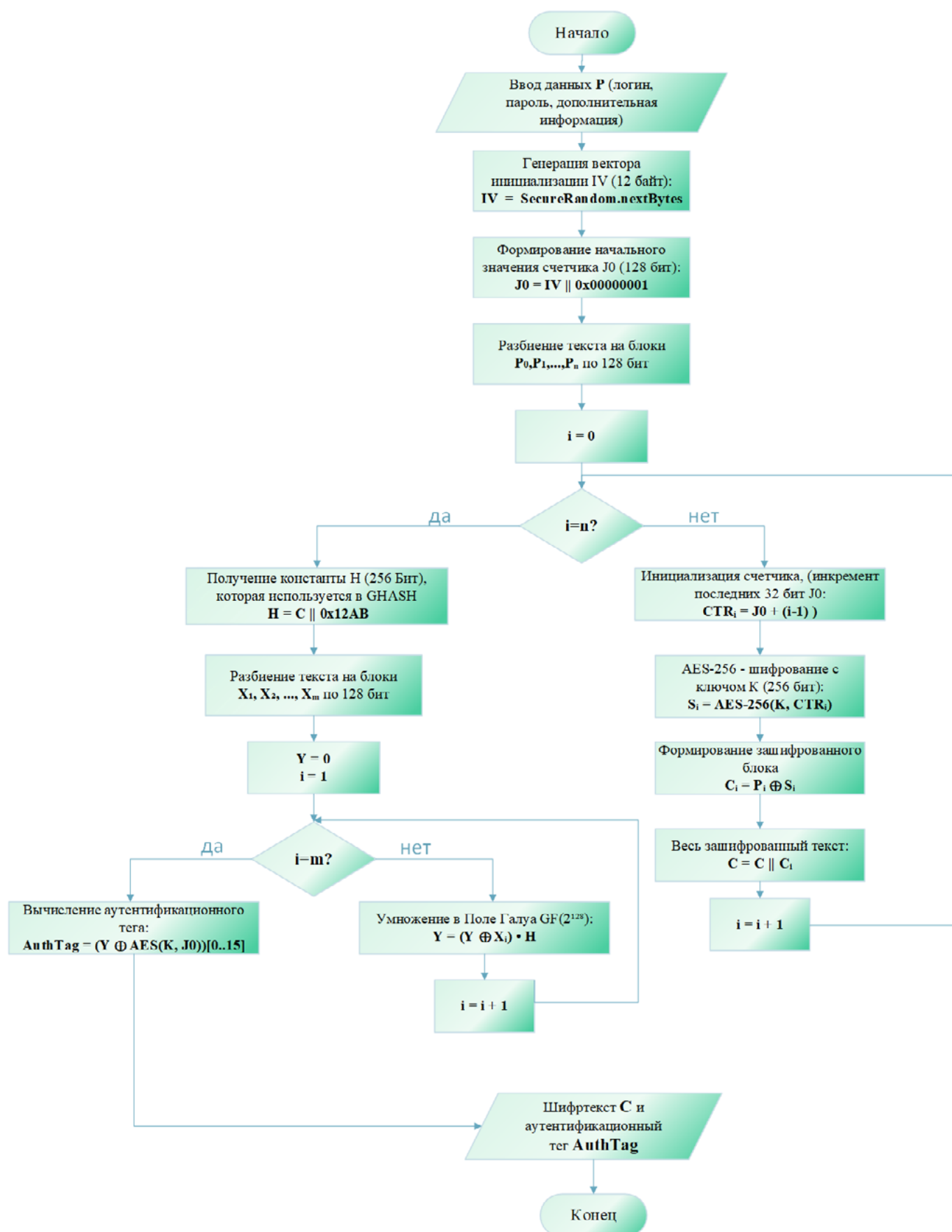


Рис. 7. Блок-схема шифрования AES-GCM

поле Галуа $GF(2^{128})$ [13]. Она последовательно обрабатывает все блоки данных и служебные параметры, включая вектор инициализации и длину сообщения. В результате формируется тег, который позволяет при расшифровке проверить целостность зашифрованной информации.

Зашифрованное сообщение, вектор инициализации, соль и тег аутентификации объединяются и кодируются в формате Base64. Полученная структура данных сохраняется в файл в виде строки, обеспечивая удобство хранения.

Заключение

Реализуемое решение основывается на применении проверенных и широко признанных криптографических стандартов. В частности, алгоритм PBKDF2 используется для получения криптографического ключа из мастер-пароля с использованием криптографической соли и большого количества итераций, что существенно повышает устойчивость к атакам методом перебора. Для обеспечения конфиденциальности и аутентификации данных применяется алгоритм симметрично-

го шифрования AES в режиме GCM, обладающий встроенным механизмом формирования аутентификационных тегов. В качестве хеш-функции используется SHA-256, обладающая высокой криптостойкостью и обеспечивающая контроль целостности обрабатываемых данных.

Такой подход соответствует современным стандартам информационной безопасности, защищая данные как от несанкционированного доступа (за счет шифрования), так и от нарушения целостности (благодаря аутентификации данных).

Разработанная программа ориентирована на учебно-прикладное использование и может быть полезна в рамках курсов, связанных с программированием, криптографией и информационной безопасностью. Она подходит для индивидуального использования студентами и преподавателями, а также может служить демонстрационной платформой для освоения принципов шифрования, генерации ключей и управления учетными записями. Программа также может применяться для защиты личных данных на персональных устройствах в условиях локального доступа без подключения к сети.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Авезова Я., Рыжков В. Утечки конфиденциальных данных из организаций: второе полугодие 2024 года // Positive Technologies. 2025. 13 марта. URL: <http://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/utechki-dannyh-aktualnye-ugrozy-vtorogo-polugodiya-2024-dlya-organizaczij> (дата обращения: 05.07.2025).
2. KeePass Password Safe. URL: <http://keepass.info> (дата обращения: 06.07.2025).
3. Bitwarden Password Manager. URL: <http://bitwarden.com> (дата обращения: 06.07.2025).
4. LastPass. URL: <http://lastpass.com> (дата обращения: 06.07.2025).
5. Toubba K. 12-22-2022: Notice of Security Incident LastPass // LastPass Blog. 2022. 22 December. URL: <http://blog.lastpass.com/posts/notice-of-security-incident> (дата обращения: 05.07.2025).
6. Иванов М. А., Чугунков И. В. Криптографические методы защиты информации в компьютерных системах и сетях: учебное пособие / под ред. М. А. Иванова. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 400 с.
7. National Institute of Standards and Technology. Computer Security Resource Center. Publications Database. URL: <http://csrc.nist.gov/publications> (дата обращения: 05.07.2025).
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002—2021. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Свод норм и правил применения мер обеспечения информационной безопасности = Information technology. Security techniques. Code of practice for information security controls: национальный стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 мая 2021 г. № 416-ст: дата введения: 2021-11-30. М.: Стандартинформ, 2021. 74 с.
9. Moriarty K., Kaliski B., Rusch A. PKCS #5: Password-Based Cryptography Specification Version 2.1 (RFC 8018). 2017. 40 p. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8018> (дата обращения: 05.07.2025).

10. Молдовян Н. А., Молдовян А. А., Еремеев М. А. Криптография: от примитивов к синтезу алгоритмов. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 448 с.
11. Баланов А. Н. Бэкенд-разработка веб-приложений: архитектура, проектирование и управление проектами: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2025. 312 с.
12. Хлебников А. OpenSSL 3. Ключ к тайнам криптографии. Лучшие способы повысить безопасность сети с применением OpenSSL 3 = Demystifying Cryptography with OpenSSL 3.0. Discover the best techniques to enhance your network security with OpenSSL 3.0 / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2023. 300 с.
13. Каширская Е. Н., Кушнир А. П. Криптографические системы: учебное пособие. М.: МИРЭА — Российский технологический университет, 2021. 66 с.

Дата поступления: 13.07.2025

Решение о публикации: 06.08.2025

Analysis of Modern Cryptographic Encryption Methods and Design of a Password Manager with Enhanced Credential Protection

Mikhail L. Glukharev — PhD in Engineering, Associate Professor of the Information Technology and IT Security Department. Research interests: information security, cryptographic data protection methods, design of secure software systems, technologies for personal data protection.
E-mail: mlglukharev@yandex.ru

Polina I. Danilova — 4th year Specialist's Degree Student in 10.05.03 Information Security of Automated Systems specialism. Research interests: cryptography, development of applications in the field of information security, implementation of secure user interfaces and encryption algorithms.
E-mail: polina_2004.11@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Glukharev M. L., Danilova P. I. Analysis of Modern Cryptographic Encryption Methods and Design of a Password Manager with Enhanced Credential Protection. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 3 (43), Pp. 5–14. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-5-14. (In Russian)

Abstract. *The study presents the development of a password manager with enhanced cryptographic protection for local storage of credentials. **Purpose:** to create a software solution that implements secure password generation, encryption, and storage using modern algorithms. **Methods:** modern cryptographic approaches were applied, including symmetric encryption (AES-GCM), hash functions (SHA-256), and the PBKDF2 algorithm for key generation based on a master password and salt. **Results:** the implementation of a Java-based software package that allows password policy configuration, protection against brute-force and dictionary attacks, and data integrity verification. A cryptographic module compliant with NIST and GOST standards has been developed. **Practical significance:** the software can be used in organizations requiring local protection of confidential data without relying on cloud technologies. It will be suitable for improving information security in small businesses, educational institutions, and development environments. **Discussion:** the paper highlights the advantages of an autonomous architecture, open-source code, and prospects for further development, including functionality expansion and adaptation for corporate use.*

Keywords: password manager, cryptographic protection, AES-GCM, PBKDF2, SHA-256, credential storage, encryption, information security, Java

REFERENCES

1. Avezova Ya., Ryzhkov V. Utechki konfidentsialnykh dannykh iz organizatsiy: vtoroe polugodie 2024 goda [Leaks of confidential data from organizations: the second half of 2024], *Positive Technologies*. Published online at March 13, 2025. Available at: <http://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/utechki-dannyh-aktualnye-ugrozy-vtorogo-polugodiya-2024-dlya-organizacziy> (accessed: July 05, 2025). (In Russian).
2. KeePass Password Safe. Available at: <http://keepass.info> (accessed: July 06, 2025).
3. Bitwarden Password Manager. Available at: <http://bitwarden.com> (accessed: July 06, 2025).
4. LastPass. Available at: <http://lastpass.com> (accessed: July 06, 2025).
5. Toubba K. 12-22-2022: Notice of Security Incident LastPass, *LastPass Blog*. Published online at December 22, 2022. Available at: <http://blog.lastpass.com/posts/notice-of-security-incident> (accessed: July 05, 2025).
6. Ivanov M. A., Chugunkov I. V. Kriptograficheskie metody zashchity informatsii v kompyuternykh sistemakh i setyakh: uchebnoe posobie [Cryptographic methods of information protection in computer systems and networks: tutorial]. Moscow, National Research Nuclear University MePhI, 2012, 400 p. (In Russian)
7. National Institute of Standards and Technology. Computer Security Resource Center. Publications Database. Available at: <http://csrc.nist.gov/publications> (accessed: July 05, 2025).
8. GOST R ISO/MEK 27002—2021. Informatsionnye tekhnologii. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Svod norm i pravil primeneniya mer obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti [GOST R ISO/IEC 27002—2021. Information technology. Security techniques. Code of practice for information security controls]. Effective from November 30, 2021. Moscow, StandartInform Publishing House, 2021, 74 p. (In Russian)
9. Moriarty K., Kaliski B., Rusch A. PKCS #5: Password-Based Cryptography Specification Version 2.1 (RFC 8018). 2017, 40 p. Available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8018> (accessed: July 05, 2025).
10. Moldovyan N. A., Moldovyan A. A., Ereemeev M. A. Kriptografiya: ot primitivov k sintezu algoritmov [Cryptography: from primitives to the synthesis of algorithms]. Saint Petersburg, BHV-Peterburg Publishing House, 2004, 448 p. (In Russian)
11. Balanov A. N. Bekend-razrabotka veb-prilozheniy: arkhitektura, proektirovanie i upravlenie proektami: uchebnoe posobie dlya vuzov [Backend development of web applications: architecture, design and project management: a tutorial for universities]. Saint Petersburg, LAN Publishing House, 2025, 312 p. (In Russian)
12. Khlebnikov A. OpenSSL 3. Klyuch k taynam kriptografii. Luchshie sposoby povysit bezopasnost seti s primeneniem OpenSSL 3 [Demystifying Ciphertext with OpenSSL 3.0. Discover the best techniques to enhance your network security with OpenSSL 3.0]. Moscow, DMK Press Publishing House, 2023, 300 p. (In Russian)
13. Kashirskaya E. N., Kushnir A. P. Kriptograficheskie sistemy: uchebnoe posobie [Cryptographic systems: a tutorial]. Moscow, MIREA — Russian Technological University, 2021, 66 p. (In Russian)

Received: 13.07.2025

Accepted: 06.08.2025

УДК 004.056

Противодействие фейковым новостям в современном мире

Корниенко Светлана Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информатика и информационная безопасность»
Научные интересы: информационная безопасность, защита информации.
E-mail: sv.diass99@yandex.ru

Минеева Диана Дмитриевна — студент 2-го курса направления 10.05.03 «Информационная безопасность автоматизированных систем». Научные интересы: информационная безопасность, защита информации. E-mail: i4160@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Корниенко С. В., Минеева Д. Д. Методика противодействия фейковым новостям в современном мире // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 15–24. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-15-24

Аннотация. В современном обществе в условиях нарастающей информационной войны с каждым годом все более актуальной становится проблема воздействия фейковой информации на общество. **Цель:** проследить основные механизмы воздействия ложной информации на человека и предложить методы противодействия. **Результаты:** приводится иерархическая классификация типов фейковых новостей. Выявлены и структурированы наиболее значимые причины психологического воздействия подобной информации на человека. Разработана система рекомендаций по противодействию недостоверной информации на уровне личности, общества и государства. **Практическая значимость:** проведенное исследование способствует повышению уровня психологической защиты граждан от опасных информационно-психологических воздействий.

Ключевые слова: информационная безопасность, информационно-психологическое воздействие, фейковая информация, противодействие фейковой информации

2.3.6 — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

Введение

В условиях стремительной популяризации соцсетей и активного роста скорости распространения контента проблема дезинформации и фейковых новостей приобретает более острый характер, все чаще мы сталкиваемся с неконтролируемым потоком противоречивых новостных сообщений.

Так, по данным опроса, проведенного в феврале 2025 года АНО «Диалог Регионы», каждый пятый житель России сталкивается с фейковыми новостями как минимум один раз в неделю, каждый второй хотя бы раз попадался на ложную информацию, а каждый третий сталкивается с фейками

буквально каждый день, при этом 66 % респондентов признались, что хотя бы раз принимали за правду недостоверную или искаженную информацию, распространяемую в социальных сетях [1].

Наряду с этим дополнительную обеспокоенность вызывает рост распространения материалов, созданных с применением технологий искусственного интеллекта. Согласно данным Международной ассоциации по фактчекингу Global Fact-Checking Network (GFCN), только за первый квартал 2025 года в России количество выявленных фейковых новостей на 65 % превышает ана-

логичный показатель за весь 2024 год и более чем в 2,5 раза превосходит суммарное количество подделок, зафиксированных в 2023 году [2].

Такая динамика скорости распространения фейков обосновывает актуальность настоящего исследования: необходимость обновления представлений о феномене фейковых новостей как угрозы информационной безопасности.

Определение понятия «фейковая информация»

Фейковые новости представляют собой инструмент информационного воздействия, направленный на искажение как индивидуального, так и общественного сознания посредством манипулирования смыслами и интерпретациями содержания сообщений. Фейки позволяют создавать, изменять и обрабатывать рамки и правила поведения людей. В широком социальном контексте распространение дезинформации способствует трансформации социальных, политических и экономических представлений, формируя предвзятое восприятие идеологического оппонента. А в случае, когда объектом фейковой информации становятся конкретные компании, это ведет к подрыву деловой репутации, нарушению устойчивости функционирования организации и, как следствие, экономическим убыткам.

Термин «фейковые новости» в научной и общественной литературе превратился в контекстуально варьирующееся понятие. Данное явление определяется по-разному — от дезинформации, манипулятивного контента, сатирических сообщений, когнитивных искажений в восприятии информации до вмешательства иностранного государства в демократические процессы. Из-за отсутствия четкого определения правительство Великобритании, к примеру, в своем ответе на пятый доклад Комитета предложило разделить понятия «дезинформация» и «фейковые новости», закрепив за ними конкретные значения [3].

В Федеральном законе от 27 июля 2006 года № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» под фейковыми новостями подразумевается недостоверная общественно значимая информация, распростра-

няемая под видом достоверных сообщений, которая создает угрозу причинения вреда жизни и (или) здоровью граждан, имуществу, угрозу массового нарушения общественного порядка и (или) общественной безопасности либо угрозу создания помех функционированию или прекращения функционирования объектов жизнеобеспечения, транспортной или социальной инфраструктуры, кредитных организаций, объектов энергетики, промышленности или связи.

Это определение фиксирует две ключевые характеристики: имитацию достоверности и потенциальную опасность; поэтому представляется логичным рассматривать далее термин «фейковые новости», опираясь на него.

Классификация фейковых новостей

С целью прояснения понятийных границ и систематизации форм проявления фейковых новостей обоснованно обратиться к типологии, предложенной А. П. Суходоловым [4], в рамках которой он выделяет пять основных разновидностей:

1. В зависимости от соотношения достоверной и недостоверной информации:

- «новость» представляет собой ложь от начала до конца;
- «новость» содержит ложь на фоне в целом достоверной информации, представленной выборочно;
- в основе «новости» лежит реальное событие, отдельные фрагменты которого искажены.

2. В зависимости от достоверности обстоятельств времени и места произошедшего события:

- «новость» преподносит как новость правдивую информацию, имевшую место в прошлом;
- «новость» о событии, которое реально произошло в одном месте, преподносится как событие, произошедшее в другом.

3. В зависимости от состава лиц, упоминаемых в «новости»:

- «новость» содержит ссылку на якобы имевшее место высказывание публичного лица, размещенное от имени фейкового аккаунта;
- «новость» выставляет второстепенного участника события в качестве главного действующего лица;

- «новость», основанная на непроверенных показаниях лиц, якобы являвшихся свидетелями каких-либо событий.

4. В зависимости от целей создания и распространения:

- «новости», создаваемые и распространяемые с целью развлечения потребителя;
- «новости», создаваемые и распространяемые в целях достижения политических преимуществ;
- «новости», создаваемые в целях дискриминации лиц по признаку пола, расы, национальности, языка, происхождения, имущественного и должностного положения, места жительства, отношения к религии, убеждений, принадлежности к общественным объединениям, а также других обстоятельств;
- «новости», создаваемые и распространяемые в целях повышения интернет-трафика;
- «новости», создаваемые и распространяемые с целью мошеннического завладения денежными средствами и прочим имуществом потребителей;
- «новости», создаваемые в целях нанесения ущерба информации, хранящейся в компьютере пользователя;
- «новости», создаваемые и распространяемые с целью привлечения внимания к отдельной личности, компании, проекту или движению;
- «новости», создаваемые и распространяемые в целях манипуляции рынком или получения определенных преимуществ в экономической деятельности.

5. В зависимости от уровня восприятия достоверности:

- «новости», носящие явно фейковый характер;
- «новости», способные вызвать сомнение относительно их фейковости и побудить потребителей проверить полученную информацию;
- «новости», сфальсифицированные столь убедительно, что сомнений в их фейковости практически не возникает.

Классификация, предложенная А. П. Суходоловым, по сравнению с другими имеющимися, наиболее детально демонстрирует, что фейковые новости представляют собой не однородный феномен, а многоуровневую структуру, включаю-

щую различные механизмы искажения информации. Данный факт указывает на необходимость комплексного подхода к выявлению фейков и их оценке с учетом как содержательных параметров сообщения, так и коммуникативного контекста, в котором оно функционирует.

Информационно-психологическое воздействие фейковых новостей на человека

Для прояснения механизмов воздействия и определения потенциальных векторов противодействия дезинформации необходимо произвести анализ причин, обуславливающих склонность к ошибочному восприятию фейковых новостей в качестве достоверных.

Наиболее очевидной причиной является эмоциогенность. Анализ массива научных источников показал, что в качестве ключевого фактора в данном контексте выступает взаимодействие эмоционального состояния субъекта и аффективного заряда, транслируемого самой новостью. Результаты исследований [5] подтверждают, что определяющее значение имеет не столько мотивационный посыл сообщения, сколько спектр и интенсивность вызываемых им эмоций.

Таким образом, восприимчивость субъектов к эмоциональному воздействию со стороны фейковых новостей обусловлена в значительной степени чрезмерной опорой на собственные эмоциональные реакции. Эмоциогенная аудитория не всегда владеет эмоциональным интеллектом, что затрудняет критическое осмысление информации, способность к проверке фактов и устойчивость к манипулятивному контенту.

Второй причиной является консерватизм структуры мозга. Согласно наблюдениям этолога Д. Морриса (D. Morris), изложенным в работе «Голая обезьяна», структура человеческого мозга с момента палеолита претерпела незначительные изменения, оставаясь адаптированной преимущественно к задачам выживания в условиях дикой природы, где приоритет отдавался способности быстро распознавать потенциальные угрозы. Такая консервативность структуры соответствует концепции

эволюционного несоответствия, согласно которой быстро меняющаяся современная среда вступает в конфликт с медленно эволюционировавшими механизмами восприятия и реагирования. Таким образом, отрицательные события и стимулы оказывают на субъект более сильное воздействие, чем позитивные [6].

Зачастую фейковые новости построены на сенсационных и тревожных сюжетах, что делает их особенно заметными и убедительными для человека. Эмоциональная нагрузка помогает таким материалам распространяться быстрее и восприниматься как более достоверные, особенно если человек опирается при оценке сообщений на «ощущение» вместо критического анализа [5].

Третьей причиной восприимчивости к фейковым новостям является низкий уровень доверия к окружающему миру. Хотя интуитивно предполагается, что недоверчивость способствует критическому мышлению и скептическому отношению к информации, исследования показывают, что низкий уровень доверия может, напротив, повышать восприимчивость к дезинформации [7]. Недоверие к официальным источникам и традиционным СМИ склоняет искать альтернативные каналы информации, включая социальные сети и мессенджеры, где распространение фейковых новостей особенно активно.

Четвертая причина, обуславливающая склонность к ошибочному восприятию фейковых новостей в качестве достоверных, связана с феноменом «пузыря фильтров». Современные цифровые платформы используют алгоритмы персонализации, которые адаптируют контент на основе предыдущих действий субъекта, его предпочтений и взаимодействий. Этот процесс приводит к формированию индивидуального медиапространства, в котором субъект попадает в состояние интеллектуальной изоляции — получает информацию, соответствующую существующим убеждениям, и реже сталкивается с альтернативными точками зрения. Кроме того, многократное повторение одних и тех же утверждений внутри «пузыря фильтров» приводит к иллюзорному эффекту правды: повторно встречаемые сообщения легче обрабатываются и

воспринимаются как более достоверные даже при отсутствии фактического подтверждения.

Таким образом, восприятие фейковых новостей тесно связано с эффектами подтверждения собственной позиции и ошибками систематической обработки информации, что подтверждают исследования в области когнитивной психологии Д. Канемана (D. Kahneman) и А. Тверски (A. Tversky).

Выделенные причины, обуславливающие склонность к ошибочному восприятию фейковых новостей как достоверных, подтверждают необходимость разработки комплексных мер противодействия, направленных на уменьшение эмоциональной восприимчивости при потреблении новостного контента.

Примеры типичных фейков

Рассмотрение понятия «фейк» как феномена современной культуры требует хотя бы краткого исторического обзора. Фейковая новость — не новинка современности, уже в Древнем Риме знали приемы искажения информации. С течением времени менялись каналы распространения, но мотивация и механика дезинформации сохраняют общие черты до сих пор: целенаправленность, эмоциональный резонанс и обход критического восприятия аудитории.

Во время борьбы за власть между Октавианом Августом и Марком Антонием, двумя влиятельными римскими военачальниками, возникло некое свидетельство — так называемое «завещание Марка Антония». Согласно распространенной версии, в документе содержались положения, затрагивавшие интересы Рима и его граждан (наделение союзников обширными землями, уступки восточным провинциям и т. п.).

Фейковая новость была направлена на подрыв репутации Марка Антония как защитника Римской республики, приписывая ему антигосударственные намерения. Также свою роль сыграли и предрассудки римлян — они опасались чрезмерного влияния восточных обычаев после кампаний Помпея; «завещание» усиливало эти страхи. Взаимодействие имеющихся эмоций населения и аффективного заряда, транслируемого самой но-

востью, усилила информационная компания — поддельный документ публично обсуждали перед Сенатом, раздавали списки «пунктов завещания» горожанам и легионерам.

Таким образом, эффективность воздействия обеспечивалась отсутствием альтернативных источников информации, невозможностью оперативного опровержения, высокой степенью доверия к официальным политическим структурам, взаимодействием имеющихся и кратковременных эмоций и массовым систематическим повторением тезисов «завещания» среди граждан и легионеров, то есть закреплением ложного послания в общественном сознании.

В результате Сенат лишил Марка Антония права командовать легионами, а широкие массы восприняли его как изменника родине. Ослабленный информационно и политически Марк Антоний утратил возможность эффективно сопротивляться, что привело к установлению единоличной власти Октавиана Августа, который, в свою очередь, утвердил себя в качестве защитника традиционных римских ценностей, одержав тем самым не только политическую, но и информационную победу.

Первое появление фейковых новостей в СМИ датируется 1835 годом. Тогда нью-йоркская газета The Sun выпустила серию из шести статей о «живых обитателях Луны»: человекоподобных созданиях с крыльями, единорогах и двуногих бобрах. Материалы сопровождалась подробными «наблюдениями» через «новейший телескоп» с ссылкой на «Эдинбургский научный вестник».

Газета, основанная лишь несколько лет назад, стремилась расширить читательскую аудиторию через сенсационные материалы, и, несмотря на абсурдность, публикации вызвали широкий общественный резонанс, чем значительно увеличили тираж газеты.

Эффективность воздействия «Лунного розыгрыша» обеспечивалась сочетанием нескольких взаимосвязанных факторов: возрастающая грамотность населения, стремление широкой аудитории к приобщению к научным достижениям и господствующее в то время высокое доверие к печатным изданиям, репутация которых считалась залогом

их выживания на рынке. Дополнительный эффект достоверности обеспечивала прямая отсылка к имени сэра Джона Гершеля, ведущего британского астронома того времени, и его «секретаря» Эндрю Гранта, что создавало иллюзию научного подтверждения каждой «сенсации». Также эмоциональный резонанс, возникший из-за взаимодействия ожидания обществом того времени научных открытий и сенсационного повествования, многократно усиливался за счет последовательного повторения тезисов о «лунных обитателях» в шести выпусках серии, что способствовало закреплению ложного нарратива в общественном сознании.

В результате меньше чем через месяц «Лунный розыгрыш» разоблачили, а общество стало более скептическим к слишком «удивительным» новостям. Другие газетные издания эпохи не последовали примеру The Sun, а укрепление профессиональных журналистских стандартов в последующие годы препятствовало массовому тиражированию подобных псевдонаучных сенсаций.

Оба рассмотренных случая демонстрируют базовые механизмы воздействия фейковых новостей: целенаправленное конструирование ложного нарратива, апелляция к доминирующим общественным ожиданиям и стратегическое использование источников доверия. Анализ подобных исторических примеров позволяет выделить ключевые направления методик противодействия фейковым новостям: формирование критического восприятия информации, повышение медиаграмотности, развитие механизмов верификации, способных оперативно опровергать ложную информацию.

В качестве более актуальных примеров можно рассмотреть несколько ярких случаев распространения фейковых новостей, связанных с деятельностью компании ОАО «РЖД», целью которых был подрыв деловой репутации, дестабилизация функционирования организации и экономические убытки.

В течение года псевдоаккаунт @ГендиректорРЖД, выдававший себя за О. В. Белозерова, систематически публиковал «заявления» о повышении зарплаты, об отмене выходных дней и о «новых указах» руководства, требовал «уважительного от-

ношения» к «главе корпорации» и угрожал дисциплинарными мерами за «непослушание».

Эффект достоверности обеспечивало имя Белозерова, создавая тем самым общественный резонанс, а обсуждения в СМИ и социальных сетях стимулировали дополнительное распространение дезинформации и подрывали репутацию компании.

В результате аккаунт заблокировали, почти всю информацию о нем удалили, оставив в медиапространстве лишь две статьи об инциденте, одна из которых опубликована на портале «ВГудок».

Наряду с официальным отраслевым изданием «Гудок» существует интернет-ресурс «ВГудок», отличающийся постоянным негативным фоном повествования. Несмотря на невысокую посещаемость, в нем регулярно публикуются «сенсационные» материалы о «кризисе внутри РЖД», «финансовых злоупотреблениях» и «сокрытии аварийных ситуаций». При этом значительная часть новостных заметок основывается на непроверенных источниках или слухах, что позволяет редакции удерживать темп подачи «контент-шума», но одновременно с этим формирует у узкой аудитории искаженное представление о состоянии дел в компании.

Более яркий пример — целевые мошеннические атаки, направленные на сотрудников и руководителей ОАО «РЖД». Злоумышленники создавали в социальных сетях фейковые аккаунты, используя либо общедоступную информацию, либо материалы, полученные в результате взлома. Также отмечались случаи, когда с использованием инструментов социальной инженерии и искусственного интеллекта мошенники при звонках подделывали как голос, так и видеоизображение. Подобные «дипфейк-звонки» сопровождалась просьбами о переводе средств, раскрытии конфиденциальных данных или мобилизации персонала в нерабочее время.

Мошеннические действия охватили все подразделения ОАО «РЖД», что привело к временной дезорганизации работы и финансовым потерям. В качестве ответных мер организация оперативно реализовала комплекс противодействия: помимо информационно-разъяснительной работы с

сотрудниками, были задействованы технические контрмеры, включающие блокировку фальшивых аккаунтов.

ОАО «РЖД» — стратегически важная транспортная компания, которая в силу своего масштаба, публичности и социального значения нередко становится мишенью для информационных атак — целенаправленного распространения дезинформации, направленной на подрыв доверия к руководству, дестабилизацию внутренних процессов и причинение не только репутационного, но и экономического ущерба. В свою очередь, компания показывает важность своевременного информационного реагирования, использования технических и образовательных мер защиты.

На примере ОАО «РЖД» ясно, что указанные меры должны стать неотъемлемыми элементами стратегии устойчивости к фейковым новостям для корпоративных структур.

Методы противодействия фейковым новостям

Как было упомянуто ранее, фейковые новости представляют собой не однородный феномен, а многоуровневую структуру, включающую различные механизмы искажения информации. Склонность общественности воспринимать дезинформацию как достоверный контент объясняется эмоциогенностью, особенностями нейрокогнитивной обработки информации, низким уровнем доверия к официальным источникам и эффектом «пузырей фильтров», возникающих под воздействием алгоритмической персонализации новостных лент. Механизм противодействия должен включать не только анализ содержательных параметров сообщений, но и учет коммуникативного контекста, эмоциональной восприимчивости.

Анализ массива научных источников показывает, что зачастую меры противодействия фейковым новостям классифицируют по характеру воздействия, по субъекту и по направлению реализации.

По характеру воздействия меры разделяют на прямые и косвенные. Первые ориентированы на противодействие непосредственно фейковой информации посредством ее опровержения, стратеги-

ческого внедрения альтернативной сенсационной новости с целью отвлечения внимания либо путем введения технических и алгоритмических ограничений информационного пространства. Вторые, в свою очередь, направлены на предупреждение появления и распространения фейка. К ним относятся правовое регулирование, административный контроль, а также развитие медиаграмотности и критического восприятия информации у общественности.

В современных условиях борьба с дезинформацией осуществляется посредством комплекса технических, правовых и образовательных механизмов.

Под техническими мерами понимаются цифровые решения, направленные на верификацию контента, среди которых можно выделить анализ текстовых признаков, моделирование сетевых паттернов распространения информации, использование технологии блокчейн и инициативы локальных платформ.

К примеру, разработаны инструменты, которые автоматически проверяют ссылки на информационные ресурсы, анализируя заголовки и стилистические характеристики текста, или строят графы распространения сообщений в социальных сетях и сверяют их с хронологическими паттернами, характерными для ранее зафиксированных линий дезинформации [8]. Примером реализации подобных подходов служат системы Fake News Detector и Text Analytics Toolkit, использующие технологии машинного обучения и обработки естественного языка (NLP) для оценки достоверности контента.

Предлагаются и блокчейн-решения: новости записываются в неизменяемый реестр с временной меткой, что обеспечивает проверяемость источников и защиту оригинального содержания от несанкционированных изменений. Среди таких решений можно выделить международный проект News Provenance Project [9], реализуемый в партнерстве с IBM, и отечественную платформу TrueStory на базе Hyperledger.

Некоторые российские цифровые экосистемы внедряют собственные системы фильтрации недостоверного контента и алгоритмы раннего предупреждения пользователей. В частности, Mail.ru

Group, Telegram, «ВКонтакте» и «Яндекс Браузер» применяют модули автоматического анализа и маркировки сомнительных источников информации [10, 11].

Правовые меры включают законодательные инициативы, нацеленные на административное или уголовное наказание за распространение фейков. В России с 2019 года действуют Федеральные законы № 31-ФЗ и № 27-ФЗ, регламентирующие ответственность за распространение «заведомо недостоверной общественно значимой информации» в СМИ или онлайн. В марте 2022 года были внесены еще более строгие поправки в законы № 32-ФЗ и № 1-ФЗ: за распространение фейков и дискредитацию действий Вооруженных Сил Российской Федерации по новой статье УК РФ установлены штрафы до нескольких миллионов рублей и сроки до 15 лет, а также конфискация имущества. Однако стоит отметить, что председатель Комитета по государственному строительству и законодательству Павел Крашенинников подчеркнул, что основная цель данных штрафов — профилактическая, с этим и было связано их увеличение при доработке законопроекта [12].

Образовательные меры предполагают повышение медиаграмотности населения и развитие критического мышления. В России власти и некоммерческие организации (НКО) начали включать медиаграмотность в школьную программу. Так, Министерство просвещения Российской Федерации запустило масштабный проект по развитию медиаграмотности у школьников: ученикам преподают, как отделять правду от фейков, искать достоверные источники в интернете и работать с информацией. Уже открыты специальные классы в Москве, Петербурге, Тюменской, Калужской, Ульяновской областях, Ставропольском крае и других регионах [13]. Помимо этого, реализуются внеурочные курсы и интерактивные уроки: например, в 2023 году в Краснодаре начала работать первая в России «Школа медиаграмотности» для детей и взрослых — проект Лиги безопасного Интернета и Национального центра помощи детям [14]. Аналогичные курсы организуются и в университетах: факультеты журналистики вводят дисциплины по

борьбе с дезинформацией, а педагогические сообщества разрабатывают методики для преподавателей. Эти просветительские меры направлены на долгосрочное формирование у населения умения распознавать фейки и самостоятельно анализировать медийный контент.

По субъекту реализации противодействие фейковым новостям разделяется на государственные и частные. К первым относятся ранее упомянутые правовые и образовательные меры, такие как поправки в федеральные законы, включение медиаграмотности в школьную и вузовскую программы, государственные СМИ.

Вместе с тем в частном секторе развивается собственная медиаэкосистема фактчекинга. Ряд СМИ создали собственные сервисы проверки фактов или интегрировали их в новостные приложения. Например, ТАСС запустил проект «Проверка информации», сотрудничая с платформой «Яндекс Дзен» для оперативного оповещения о фейках. Независимые редакции публикуют расследования, исправления и аналитические материалы, направленные на разоблачение дезинформации. Индустрия фактчекинга в России постепенно формируется как устойчивый сегмент цифровой экосистемы.

В 2025 году ТАСС, АНО «Диалог Регионы» и «Мастерская новых медиа» создали Международную ассоциацию по фактчекингу Global Fact-Checking Network (GFCN), противодействующую распространению фейковой информации на межгосударственном уровне. Растет число негосударственных платформ, предоставляющих пользо-

вателям возможность направлять сомнительные материалы на проверку: проекты «Лапша Медиа», «Войнафейками.рф». Некоторые НКО, например АНО «Диалог» и Лига безопасного Интернета, проводят регулярные образовательные кампании по темам дезинформации.

Важно отметить, что государственные и негосударственные субъекты способны выполнять одни и те же задачи по противодействию фейкам. Тем не менее наибольшая эффективность достигается при условии межсекторального сотрудничества и тесной кооперации.

Таким образом, лишь посредством комплексной интеграции технических, правовых и образовательных механизмов противодействия фейковой информации, а также при тесном взаимодействии государственных и частных институтов возможно обеспечить достижение максимально эффективных результатов.

Заключение

В современных условиях мировой информационной войны проблеме противодействия фейковой информации уделяется большое внимание на всех уровнях общества. Построение системы рекомендаций как для отдельных граждан, так и для организаций, общественных групп и государства в целом является одной из приоритетных задач при обеспечении информационно-психологической безопасности российского общества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фейковая информация в России — кто верит лжи? // Global Fact-Checking Network. 2025. 15 апреля. URL: <http://globalfactchecking.com/fejkovaya-informacziya-v-rossii-kto-verit-lzhi> (дата обращения: 04.05.2025).
2. GFCN на Пятнадцатом Российском форуме по управлению интернетом (RIGF 2025) // Global Fact-Checking Network. 2025. 08 апреля. URL: <http://globalfactchecking.com/ru/gfcn-na-pyatnadczzatom-rossijskom-forume-po-upravleniyu-internetom-rigf-2025> (дата обращения: 04.05.2025).
3. Disinformation and “fake news”: Interim Report: Government Response to the Committee’s Fifth Report // UK Parliament. 2018. 23 October. URL: <http://publications.parliament.uk/pa/cm201719/cmselect/cmcumeds/1630/163002.htm> (дата обращения: 28.04.2025).
4. Суходолов А. П. Феномен «фейковых новостей» в современном медиапространстве // Евроазиатское сотрудничество: гуманитарные аспекты = Cooperation Eurasiatique: enjeux de societe: материалы Международной научно-практической конференции (Иркутск, Россия, 14–15 сентября 2017 г.). Иркутск: Изд-во Байкальского гос. ун-та, 2017. С. 93–112.

5. Martel C., Pennycook G., Rand D. G. Reliance on Emotion Promotes Belief in Fake News // *Cognitive Research: Principles and Implications*. 2020. Vol. 5. Art. No. 47. DOI: 10.1186/s41235-020-00252-3.
6. Bad Is Stronger Than Good / R. F. Baumeister, E. Bratslavsky, C. Finkenauer, K. D. Vohs // *Review of General Psychology*. 2001. Vol. 5, Iss. 4. Pp. 323–370. DOI: 10.1037/1089-2680.5.4.323.
7. Монтан К. Новые боги. Как онлайн-платформы манипулируют нашим выбором и что вернет нам свободу / пер. с нем. Е. Токовининой. М.: Individuum, 2023. 352 с.
8. Кораблина Т. В., Бабичева Н. Б., Гусев М. М. Использование графовой модели для описания распространения информации в социальной сети // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2022. № 4 (42). С. 33–39. DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-33-39.
9. The News Provenance Project. URL: <http://newsprovenanceproject.org> (дата обращения: 06.05.2025).
10. Проверено.Медиа — Фактчекинг на русском языке. URL: <http://provereno.media> (дата обращения: 06.05.2025).
11. Protect: безопасная работа в интернете. URL: <http://browser.yandex.ru/security> (дата обращения: 06.05.2025).
12. Что такое фейковые новости и как за них будут наказывать? // Официальный сайт Государственной Думы Федерального собрания Российской Федерации. 2019. 07 марта. URL: <http://duma.gov.ru/news/29982> (дата обращения: 06.05.2025).
13. Почтарук А. Минпросвещения занялось развитием медиаграмотности школьников // *Газета.Ru*. 2023. 27 ноября. URL: <http://www.gazeta.ru/tech/news/2023/11/27/21798355.shtml> (дата обращения: 06.05.2025).
14. В Краснодаре откроется первая в России Школа Медиаграмотности // *Лига безопасного Интернета*. 2023. 23 июня. URL: <http://ligainternet.ru/v-krasnodare-otkroetsya-pervaya-v-rossii-shkola-mediagramotnosti> (дата обращения: 06.05.2025).

Дата поступления: 10.07.2025

Решение о публикации: 06.08.2025

Countering Fake News in the Modern World

Svetlana V. Kornienko

— PhD in Engineering, Associate Professor of the Information Technology and IT Security Department. Research interests: information security, information protection. E-mail: sv.diass99@yandex.ru

Diana D. Mineeva

— 2nd year Specialist's Degree Student in 10.05.03 Information Security of Automated Systems specialism. Research interests: information security, information protection. E-mail: i4160@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kornienko S. V., Mineeva D. D. Countering Fake News in the Modern World. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 3 (43), Pp. 15–24. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-15-24. (In Russian)

Abstract. *In the context of the escalating information warfare that characterises contemporary society, the issue of the impact of disinformation on society is becoming increasingly pressing on an annual basis. **Purpose:** to identify the primary mechanisms through which false information impacts an individual and to propose methodologies for counteracting such effects. **Results:** the paper provides a hierarchical classification of fake news types. The most significant causes of psychological impact of such information on an individual have been identified and structured. The development of a system of recommendations for counteracting inaccurate information at the individual, societal and state levels has been undertaken. **Practical significance:** the research conducted will contribute to an increase in the level of psychological protection of citizens from dangerous information-psychological influences.*

Keywords: *information security, information-psychological impact, fake information, counteraction to fake information*

REFERENCES

1. Fake News in Russia — Who believes in lies? *Global Fact-Checking Network*. Published online at April 15, 2025. Available at: <http://globalfactchecking.com/fake-news-in-russia-who-believes-the-lies> (accessed: May 04, 2025).
2. GFCN participation in the Fifteenth Russian Internet Governance Forum (RIGF 2025), *Global Fact-Checking Network*. Published online at April 08, 2025. Available at: <http://globalfactchecking.com/gfcn-participation-in-the-fifteenth-russian-internet-governance-forum-rigf-2025> (accessed: May 04, 2025).
3. Disinformation and “fake news”: Interim Report: Government Response to the Committee’s Fifth Report, *UK Parliament*. Published online at October 23, 2018. Available at: <http://publications.parliament.uk/pa/cm201719/cmselect/cmcumeds/1630/163002.htm> (accessed: April 28, 2025).
4. Sukhodolov A. P. Fenomen “feykovykh novostey” v sovremennom mediaprostranstve [The Phenomenon of “Fake News” in the Modern Media Space], *Evroaziatskoe sotrudnichestvo: gumanitarnye aspekty: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Eurasian Cooperation: Humanitarian Aspects: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]*, Irkutsk, Russia September 14–15, 2017. Irkutsk, Baikal State University Publ., 2017. Pp. 93–112. (In Russian)
5. Martel C., Pennycook G., Rand D. G. Reliance on Emotion Promotes Belief in Fake News, *Cognitive Research: Principles and Implications*, 2020, Vol. 5, Art. No. 47. DOI: 10.1186/s41235-020-00252-3.
6. Baumeister R. F., Bratslavsky E., Finkenauer C., Vohs K. D. Bad Is Stronger Than Good, *Review of General Psychology*, 2001, Vol. 5, Iss. 4, Pp. 323–370. DOI: 10.1037/1089-2680.5.4.323.
7. Montag C. Novye bogi. Kak onlayn-platformy manipuliruyut nashim vyborom i chto vernet nam svobodu [New Gods: How Online Platforms Manipulate Our Choices and What Will Give Us Back Our Freedom]. Moscow, Individuum, 2023. 352 p. (In Russian)
8. Korablina T. V., Babicheva N. B., Gusev M. M. Ispolzovanie grafovoy modeli dlya opisaniya rasprostraneniya informatsii v sotsialnoy seti [Using a Graph Model to Describe the Distribution of Information in a Social Network], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta [Bulletin of the Siberian State Industrial University]*, 2022, No. 4 (42), Pp. 33–39. DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-33-39. (In Russian)
9. The News Provenance Project. Available at: <http://newsprovenanceproject.org> (accessed: May 06, 2025).
10. Provereno.Media. Available at: <http://provereno.media> (accessed: May 06, 2025). (In Russian)
11. Protect: bezopasnaya rabota v internete [Protect: safe work on the Internet]. Available at: <http://browser.yandex.ru/security> (accessed: May 06, 2025). (In Russian)
12. Chto takoe feykove novosti i kak za nikh budut nakazyvat? [What is fake news and how will they be punished?], *Ofitsialnyy sayt Gosudarstvennoy Dumy Federalnogo sobraniya Rossiyskoy Federatsii [Official website of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation]*. Published online at March 07, 2019. Available at: <http://duma.gov.ru/news/29982> (accessed: May 06, 2025). (In Russian)
13. Pochtaruk A. Minprosveshcheniya zanyalos razvitiem mediagramotnosti shkolnikov [The Ministry of Education is engaged in the development of media literacy of schoolchildren], *Gazeta.Ru*. Published online at November 27, 2023. Available at: <http://www.gazeta.ru/tech/news/2023/11/27/21798355.shtml> (accessed: May 06, 2025). (In Russian)
14. V Krasnodare otkroetsya pervaya v Rossii Shkola Mediagramotnosti [The first Media Literacy School in Russia will open in Krasnodar], *Liga bezopasnogo Interneta [Safe Internet League]*. Published online at June 23, 2023. Available at: <http://ligainternet.ru/v-krasnodare-otkroetsya-pervaya-v-rossii-shkola-mediagramotnosti> (accessed: May 06, 2025). (In Russian)

Received: 10.07.2025

Accepted: 06.08.2025

УДК 004.051

Многоагентная архитектура для интеллектуальной диагностики подвижного состава: концепция и прототипирование

Барановский Анатолий Михайлович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационно-управляющие системы, контроль, диагностирование и управление техническим состоянием, нейронные сети.
E-mail: bamvka@mail.ru

Бобриков Даниил Алексеевич — магистр, аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных.
E-mail: daniil20001210@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Барановский А. М., Бобриков Д. А. Многоагентная архитектура для интеллектуальной диагностики подвижного состава: концепция и прототипирование // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 25–32. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-25-32

Аннотация. Рассматривается подход к построению интеллектуальной системы диагностирования и восстановления работоспособности информационно-управляющих систем (ИУС) подвижного состава на основе многоагентной архитектуры. **Введение:** в связи с увеличением сложности ИУС подвижного состава возникает необходимость повышения надежности и возрастает потребность в интеллектуальных системах диагностики и восстановления. В настоящее время традиционные централизованные методы теряют свою эффективность в определенных условиях. **Цель:** разработка концепции интеллектуальной системы диагностирования и восстановления работоспособности ИУС подвижного состава, основанной на многоагентной архитектуре, с возможностью внедрения в существующую транспортную инфраструктуру. **Методы:** предложен подход, при котором каждый агент в системе выполняет специализированные задачи: сбор телеметрической информации, анализ и фильтрацию данных, формирование диагностических признаков и принятие решений о техническом состоянии системы. Архитектура системы предусматривает многоуровневую организацию и протоколы взаимодействия между агентами. **Результаты:** формирование архитектурной модели и концепции прототипа, демонстрирующего функционирование распределенной интеллектуальной системы. Представление ключевых компонентов, интерфейса взаимодействия, аппаратной и программной реализации. **Практическая значимость:** разработанный подход может служить для повышения устойчивости и автономности транспортных систем в реальных эксплуатационных условиях. **Обсуждение:** возможность масштабирования прототипа, его интеграция в существующие ИУС.

Ключевые слова: многоагентные системы, нейросетевые технологии, транспорт, информационно-управляющие системы, автоматизация

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Введение

Современные интеллектуальные транспортные системы предъявляют все более жесткие требования к надежности и автономности управления. Это особенно актуально для подвижного состава, когда в условиях интенсивной эксплуатации и большого объема данных необходимо быстрое выявление и устранение неисправностей. Автоматизация процессов технической диагностики становится ключевым направлением повышения безопасности и эффективности эксплуатации транспорта.

Традиционные централизованные системы диагностики часто не удовлетворяют требованиям масштабирования, оперативности обработки информации и собственной отказоустойчивости. Это делает необходимым внедрение новых архитектурных решений, способных обеспечить распределенное принятие решений, самодиагностику и адаптацию к изменяющимся условиям эксплуатации [1, 2].

Одним из перспективных подходов является использование многоагентных систем (МАС), каждая из которых может автономно обрабатывать поступающую информацию, взаимодействовать с другими агентами и совместно решать задачи диагностирования. Такое распределенное управление особенно эффективно в условиях транспортной инфраструктуры со множеством узлов и компонентов [3, 4].

Описание архитектуры прототипа системы

Разрабатываемый прототип интеллектуальной системы диагностики построен на основе многоуровневой многоагентной архитектуры. Основными уровнями являются (рис. 1):

- сбор и предварительная обработка данных;
- диагностика локальных агентов;
- координация и принятие решений.

Каждый уровень представляет собой совокупность специализированных агентов, выполняющих ограниченный круг задач и взаимодействующих между собой через интерфейсы.



Рис. 1. Графическое представление архитектуры прототипа

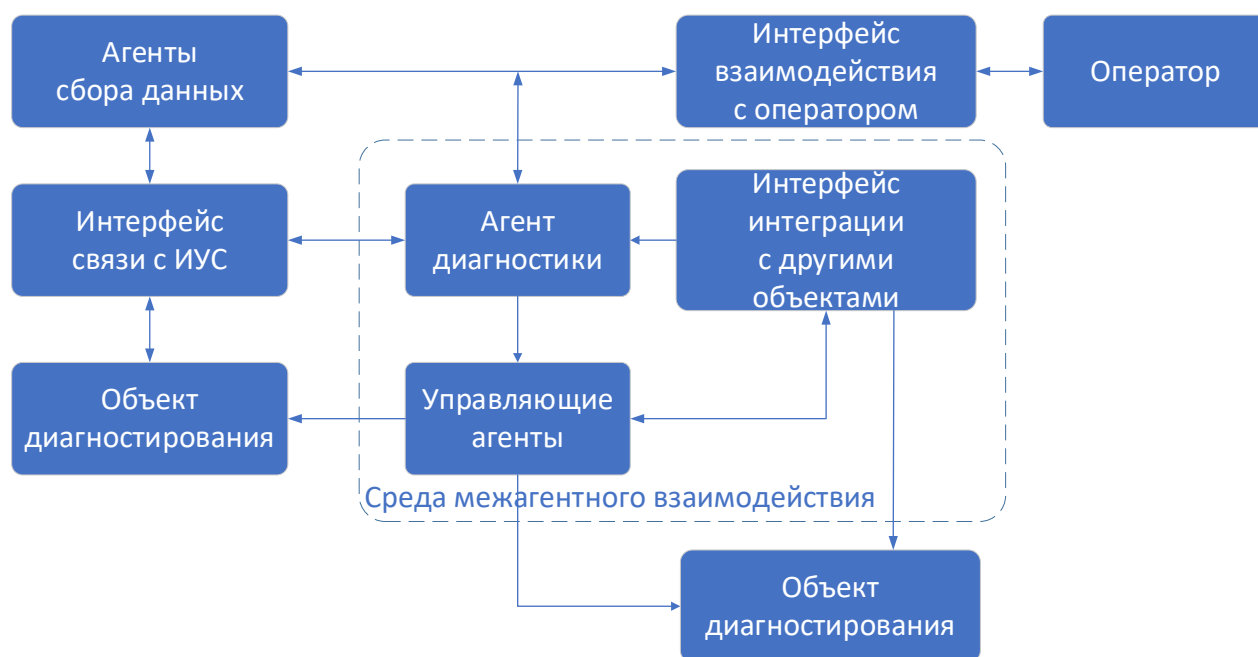


Рис. 2. Компоненты системы и их взаимодействие

Агенты нижнего уровня осуществляют мониторинг состояния оборудования, сбор телеметрической информации и первичную фильтрацию данных. Далее информация передается агентам диагностики, которые анализируют полученные данные, сравнивают их с эталонными параметрами и выявляют потенциальные неисправности.

На уровне координации происходит агрегирование диагностических заключений и синтез комплексных выводов о техническом состоянии систем. Итоговые решения принимаются на верхнем уровне, где также возможна интеграция с внешними системами управления, технического обслуживания и логистики [5–7].

Компоненты и интерфейсы прототипа системы диагностирования

Ключевыми компонентами прототипа являются агенты сбора данных, агенты диагностики, управляющие агенты, интерфейсы взаимодействия с оператором, а также интерфейс интеграции с другими элементами информационно-управляющих систем (ИУС) (рис. 2). Все агенты функционируют в условиях распределительной среды и взаимодействуют по принципам стандартизированных протоколов обмена сообщениями.

Особое внимание уделяется взаимодействию с реальным подвижным составом. Интерфейс связи с ИУС обеспечивает безопасный и защищенный доступ к телеметрической информации, а также возможность передачи управляющих воздействий в режиме реального времени. Архитектура прототипа предусматривает возможность функционирования как в онлайн-, так и в офлайн-режиме [8, 9].

Межагентное взаимодействие реализуется посредством среды, обеспечивающей маршрутизацию сообщений, синхронизацию состояний и устойчивость к сбоям. Протоколы взаимодействия основаны на стандартах FIPA и JADE, что обеспечивает совместимость и гибкость при развитии системы [10].

Масштабирование системы и интеграция с ИУС

Одним из важнейших аспектов практической реализации разработанного прототипа является обеспечение возможности масштабирования. Архитектура предусматривает легкое добавление новых агентов, адаптацию под различный подвижной состав и расширение функций без необходимости кардинальной перестройки системы.



Рис. 3. Схематичный пример реализации архитектуры

Интеграция с реальными ИУС осуществляется через адаптеры данных и интерфейсы, согласованные с существующими прототипами транспортной отрасли. Это позволяет внедрять систему поэтапно, начиная с отдельных компонентов и постепенно охватывая все большее число узлов и агрегатов подвижного состава.

Разработка ведется с учетом совместимости с существующей IT-инфраструктурой транспортных предприятий. Использование контейнеризации и микросервисной архитектуры упрощает развертывание и сопровождение системы в продуктивной среде [11, 12].

Пример реализации архитектуры для диагностики вычислительных средств ИУС

В качестве примера реализации предлагаемой архитектуры рассмотрим реализацию многоагентной архитектуры для задач диагностики вычислительных средств ИУС подвижного состава (рис. 3). Эта система предназначена для постоянного мониторинга технического состояния, обнаружения от-

казов, а также оперативного реагирования на возникающие дефекты ИУС [13].

На первом уровне функционируют агенты сбора данных, которые осуществляют регулярный мониторинг ключевых аппаратных компонентов: температуры центрального процессора, графического ускорителя, состояния накопителей (SSD/HDD), системы охлаждения (включая состояние и обороты вентиляторов), аккумуляторных батарей (ИБП), а также устройств ввода-вывода. Кроме того, они фиксируют параметры загрузки CPU, использование оперативной памяти и обращение к системному диску. Эти агенты используют стандартные программные интерфейсы операционной системы и специализированные библиотеки аппаратного мониторинга.

Следующий уровень архитектуры представлен агентами диагностики. Они анализируют собранные данные, используя как пороговые значения, так и модели, обученные на исторических данных, включая контрольные отклонения и критические тренды. Например, агент может выявить призна-

ки перегрева видеокарты, учащение сбоев в логах работы жесткого диска, нестабильную работу вентиляторов или повышение температуры при обычной нагрузке программного характера: контроль за вредоносным ПО, сканирование на вирусы, анализ системных журналов (логов Windows/Linux) на наличие критических и повторяющихся ошибок.

На уровне координации управляющие агенты агрегируют диагностические заключения, формируют прогноз отказов (например, на основе увеличенного времени отклика системы или частых зависаний) и передают информацию на уровень принятия решений. Здесь осуществляется оценка критичности текущего состояния, возможное автоматическое отключение оборудования или формирование уведомления для оператора о необходимости технического вмешательства. Через интерфейс взаимодействия с оператором пользователю выводятся рекомендации: очистка системы охлаждения, замена термопасты, дефрагментация диска или удаление подозрительных процессов.

Интерфейс интеграции с другими ИУС обеспечивает передачу диагностических данных в централизованную систему управления, где они могут использоваться для аналитики, формирования отчетов и планирования профилактических работ. Благодаря стандартизированным протоколам система легко масштабируется и интегрируется в существующую цифровую инфраструктуру подвижного состава.

Таким образом, предлагаемый прототип демонстрирует гибкость и адаптивность многоагентной

архитектуры при решении прикладной задачи диагностики вычислительных средств, повышая надежность ИУС и снижая риск отказов в критических ситуациях [14–16].

Заключение

Разработка и внедрение многоагентных систем в процессы интеллектуальной диагностики подвижного состава представляет собой перспективное направление, способное кардинально повысить эффективность эксплуатации и обслуживания транспортных средств. Благодаря распределенной природе таких систем обеспечивается высокая степень адаптивности, устойчивости к сбоям и отказам оборудования, возможность локального принятия решения, что особенно актуально в условиях постоянно изменяющихся внешних факторов и требований к безопасности.

Использование агентов различной специализации позволяет реализовать как локальную, так и глобальную диагностику, оперативно выявлять неисправности, прогнозировать отказы и инициировать процессы восстановления работоспособности. При этом интеграция методов машинного обучения и экспертных подходов в рамках многоагентной архитектуры позволяет существенно расширить функциональность и интеллектуальные возможности системы, эффективно использовать большие потоки данных о функционировании ИУС, оперативно пополнять новыми данными и дообучать интеллектуальное ядро системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Барановский А. М., Бобриков Д. А. Современные подходы к диагностике и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава с применением многоагентных и нейросетевых технологий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 5–13. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-5-13.
2. Wooldridge M. J. An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition. Chichester: Wiley, 2009. 488 p.
3. Jennings N. R., Wooldridge M. J. Applications of Intelligent Agents // Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets / N. R. Jennings, M. J. Wooldridge (eds.). Heidelberg: Springer Berlin, 1998. Pp. 3-28. DOI: 10.1007/978-3-662-03678-5_1.
4. Бочков А. П., Хомоненко А. Д., Барановский А. М. Модель формирования кластеров информативных узлов интегрированной и распределенной обработки данных в вычислительной сети // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13, № 1. С. 44–57. DOI: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-44-57.

5. Bellifemine F. L., Caire G., Greenwood D. Developing Multi-Agent Systems with JADE. Chichester: Wiley, 2007. 300 p.
6. Russell S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Fourth Edition. Hoboken (NJ): Pearson, 2020. 1136 p.
7. Станкевич Л. А. Интеллектуальные системы и технологии: учебник и практикум для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2025. 478 с.
8. Андронов С. А., Фетисов В. А. Интеллектуальные транспортные системы: учебное пособие. 2-е изд. М.: IPR Media, 2024. 266 с.
9. Евстафьев В. А., Тюков М. А. Искусственный интеллект и нейросети: практика применения в рекламе: учебное пособие. М.: Дашков и К, 2023. 426 с.
10. Rockwell Automation's Holonic and Multiagent Control Systems Compendium / P. Vrba, P. Tichý, V. Mařík [et al.] // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). 2011. Vol. 41, Iss. 1. Pp. 14–30. DOI: 10.1109/TSMCC.2010.2055852.
11. Werneck V. M. B., Moreira Costa R. M. E., Cysneiros L. M. Modelling Multi-Agent System Using Different Methodologies // Multi-Agent Systems — Modeling, Interactions, Simulations and Case Studies / F. Alkhateeb [et al.] (eds.). InTechOpen, 2011. Pp. 77–96. DOI: 10.5772/14792.
12. Luck M., McBurney P., Preist C. Agent Technology: Enabling Next Generation Computing (A Roadmap for Agent-Based Computing). Southampton, 2003. 100 p.
13. Pudovikov O. E., Tarasova V. N., Degtyareva V. V. Predictive Diagnostics of Rolling Stock and the Industrial Internet of Things // Russian Engineering Research. 2023. Vol. 43, Iss. 8. Pp. 987–990. DOI: 10.3103/S1068798X23080282.
14. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations. New York (NY): Cambridge University Press, 2009. 504 p.
15. Киселев Г. Г. Искусственный интеллект в системе мониторинга, диагностики и прогнозирования технического состояния подвижного состава // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 3. С. 621–626. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-621-622.
16. Использование искусственных нейронных сетей на Российских железных дорогах для контроля токоприемников поездов / В. С. Язынин, А. М. Барановский, А. А. Воробьев, И. Ю. Романова // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т. 13. № 1. С. 267–287. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-267-287.

Дата поступления: 09.06.2025

Решение о публикации: 09.08.2025

Multi-Agent Architecture for Intelligent Rolling Stock Diagnostics: Concept and Prototyping

Anatoly M. Baranovsky — PhD in Engineering, Associate Professor of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information and control systems, monitoring, diagnostics and management of technical condition, neural networks. E-mail: bamvka@mail.ru

Daniil A. Bobrikov — Master's Degree, postgraduate student of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, processing of large data. E-mail: daniil20001210@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Baranovsky A. M., Bobrikov D. A. Multi-Agent Architecture for Intelligent Rolling Stock Diagnostics: Concept and Prototyping. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 3 (43), Pp. 25–32. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-25-32. (In Russian)

Abstract. The paper considers the development of an intelligent diagnostics and recovery system for rolling stock information management system operability, based on a multi-agent architecture. **Introduction:** the growing complexity of rolling stock information management systems (IMS) demands for greater reliability and more advanced intelligent diagnostic and recovery systems. Traditional centralized methods can become inefficient under certain conditions. **Purpose:** to develop the concept of an intelligent system for diagnosing and restoring the operability of rolling stock IMS. This system is based on a multi-agent architecture that can be implemented in existing transport infrastructure. **Methods:** the proposed approach involves the implementation of a specialized task allocation system, wherein each agent within the system is assigned a specific task. These tasks encompass the collection of telemetric information, the analysis and filtration of data, the formation of diagnostic indicators, and the undertaking of decisions concerning the technical condition of the system. The system's architecture facilitates multi-level organization and interaction protocols between the agents. **Results:** the development of an architectural model and a prototype concept has been undertaken for the purpose of demonstrating the functionality of a distributed intelligent system. The presentation has focused on the key components, interaction interface, and hardware and software implementations. **Practical significance:** the developed approach has the potential to enhance the stability and autonomy of transport systems in real operating conditions. **Discussion:** the potential for scaling the prototype and integrating it into existing IMS is a subject of discussion.

Keywords: multi-agent systems, neural network technologies, transport, information management systems, automation

REFERENCES

1. Baranovsky A. M., Bobrikov D. A. Sovremennye podkhody k diagnostike i vosstanovleniyu rabotosposobnosti informatsionno-upravlyayushchikh sistem podvizhnogo sostava s primeneniem mnogoagentnykh i neyrosetevykh tekhnologiy [Modern Approaches to Diagnostics and Recovery of Rolling Stock Information Management Systems Using Multi-Agent and Neural Network Technologies], *Intellectualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2025, No. 1 (41), Pp. 5–13. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-5-13. (In Russian)
2. Wooldridge M. J. An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition. Chichester, Wiley, 2009, 488 p.
3. Jennings N. R., Wooldridge M. J. Applications of Intelligent Agents. In: *Jennings N. R., Wooldridge M. J. (eds.) Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets*. Heidelberg, Springer Berlin, 1998, Pp. 3-28. DOI: 10.1007/978-3-662-03678-5_1.
4. Bochkov A. P., Khomonenko A. D., Baranovsky A. M. Model formirovaniya klasterov informativnykh uzlov integrirovannoy i raspredelennoy obrabotki dannykh v vychislitelnoy seti [Model of Formation of Clusters of Informative Nodes of Integrated and Distributed Data Processing in a Computer Network], *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli [High Technologies in Earth Space Research]*, 2021, Vol. 13, No. 1, Pp. 44–57. DOI: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-44-57. (In Russian)
5. Bellifemine F. L., Caire G., Greenwood D. Developing Multi-Agent Systems with JADE. Chichester, Wiley, 2007, 300 p.
6. Russell S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Fourth Edition. Hoboken (NJ), Pearson, 2020, 1136 p.
7. Stankevich L. A. Intellectualnye sistemy i tekhnologii: uchebnik i praktikum dlya vuzov [Intelligent systems and technologies: textbook and practical training for universities]. Moscow: Urait Publishing House, 2025, 478 p. (In Russian)
8. Andronov S. A., Fetisov V. A. Intellectualnye transportnye sistemy: uchebnoe posobie [Intelligent transport systems: a tutorial]. Moscow, IPR Media, 2024, 266 p. (In Russian)

9. Evstafyev V. A., Tyukov M. A. *Iskusstvennyy intellekt i neyroseti: praktika primeneniya v reklame: uchebnoe posobie* [Artificial intelligence and neural networks: practical application in advertising: a tutorial]. Moscow, Dashkov and Co., 2023, 426 p. (In Russian)
10. Vrba P., Tichý P. Mařík V., et al. Rockwell Automation's Holonic and Multiagent Control Systems Compendium, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2011, Vol. 41, Iss. 1, Pp. 14–30. DOI: 10.1109/TSMCC.2010.2055852.
11. Werneck V. M. B., Moreira Costa R. M. E., Cysneiros L. M. Modelling Multi-Agent System Using Different Methodologies. In: *Alkhateeb F., et al. (eds.) Multi-Agent Systems — Modeling, Interactions, Simulations and Case Studies*. InTechOpen, 2011, Pp. 77–96. DOI: 10.5772/14792.
12. Luck M., McBurney P., Preist C. *Agent Technology: Enabling Next Generation Computing (A Roadmap for Agent-Based Computing)*. Southampton, 2003, 100 p.
13. Pudovikov O. E., Tarasova V. N., Degtyareva V. V. Predictive Diagnostics of Rolling Stock and the Industrial Internet of Things, *Russian Engineering Research*, 2023, Vol. 43, Iss. 8. Pp. 987–990. DOI: 10.3103/S1068798X23080282.
14. Shoham Y., Leyton-Brown K. *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. New York (NY), Cambridge University Press, 2009, 504 p.
15. Kiselev G. G. *Iskusstvennyy intellekt v sisteme monitoringa, diagnostiki i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnogo sostava* [Artificial Intelligence in the System of Monitoring, Diagnostics and Forecasting of the Technical Condition of Rolling Stock], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2024, Iss. 3, Pp. 621–626. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-621-622. (In Russian)
16. Yazin V. S., Baranovskiy A. M., Vorobyev A. A., Romanova I. Yu. Ispolzovanie iskusstvennykh neyronnykh setey na Rossiyskikh zheleznikh dorogakh dlya kontrolya tokopriemnikov poezdov [The Use of Artificial Neural Networks on Russian Railways to Control Current Collectors of Trains], *International Journal of Advanced Studies*, 2023, Vol. 13, No. 1, Pp. 267–287. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-267-287. (In Russian)

Received: 09.06.2025

Accepted: 09.08.2025

УДК 004.93+004

Метод оценки качества изображений, формируемых дистанционными средствами контроля состояния подвижного состава и железнодорожных путей

Шабakov Евгений Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры оптико-электронных средств контроля. Научные интересы: обработка изображений, машинное зрение, диагностика железнодорожной инфраструктуры. E-mail: eish@bk.ru

Куренков Никита Олегович — курсант кафедры оптико-электронных средств контроля. Научные интересы: обработка изображений, оценка качества данных ДЗЗ, машинное зрение. E-mail: kurenkov_2003@list.ru

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Для цитирования: Шабakov Е. И., Куренков Н. О. Метод оценки качества изображений, формируемых дистанционными средствами контроля состояния подвижного состава и железнодорожных путей // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 33–40. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-33-40

Аннотация. Рассматривается применение двумерного преобразования Уолша — Адамара для оценки качества изображений, формируемых дистанционными средствами контроля состояния подвижного состава и железнодорожных путей. **Цель:** анализ неравномерности распределения интенсивности пиксельного спектра по диагонали, позволяющий количественно оценивать степень выраженности линейных искажений на изображениях объектов ОАО «РЖД». **Методы:** анализ спектра изображения посредством преобразования Уолша — Адамара. **Результаты:** продемонстрирована применимость предложенного метода для оценки степени выраженности линейных искажений. **Практическая значимость:** применение предложенного метода для выявления различных типов линейных искажений с возможностью последующего внедрения в алгоритмы автоматического обнаружения.

Ключевые слова: оценка качества изображений, преобразование Уолша — Адамара, двумерный спектр изображения, оператор Собеля, дистанционный контроль, подвижной состав, железнодорожные пути, дефекты, диагностика

1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки); **2.9.8** — интеллектуальные транспортные системы (технические науки); **2.3.1** — системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Введение

Дистанционный контроль состояния подвижного состава и железнодорожных путей играет ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности железнодорожного транспорта. Автоматизированные системы, использующие оптические изображения, позволяют выявлять дефекты

и повреждения элементов инфраструктуры и подвижного состава, предотвращая аварии и снижая затраты на обслуживание.

Однако качество получаемых изображений может существенно влиять на эффективность работы таких систем. Различные факторы, такие как освеще-

щение, погодные условия и технические характеристики съемочного оборудования, могут приводить к искажениям, затрудняющим обнаружение и классификацию линейных искажений. В частности, на изображениях могут возникать следующие типы искажений [1]:

- размытость границ объектов, вызванная вибрацией камеры или движением объекта;
- неравномерность освещения, приводящая к потере деталей в темных или пересвеченных областях;
- атмосферные искажения, влияющие на общую резкость снимка.

Эти искажения могут приводить к следующим проблемам:

- снижение точности автоматизированного обнаружения;
- увеличение вероятности ложных срабатываний систем контроля;
- затруднение визуальной интерпретации данных операторами.

Традиционные методы оценки качества изображений, такие как пиковое отношение сигнал/шум (peak signal-to-noise ratio, PSNR) и среднеквадратичная ошибка (Mean Squared Error, MSE), ориентированы на измерение отклонений между исходным и искаженным изображением на уровне пикселей. Эти методы не всегда хорошо коррелируют с субъективным восприятием качества изображения человеком, особенно в случае структурных искажений, вызванных дефектами [2].

В статье предлагается новый метод оценки качества изображений, формируемых дистанционными средствами контроля состояния подвижного состава и железнодорожных путей, основанный на анализе с помощью оператора Собеля спектра изображения, полученного с помощью преобразования Уолша — Адамара. Этот метод позволяет более эффективно выявлять линейные искажения и обеспечивает более точную оценку качества изображений для задач диагностики и мониторинга.

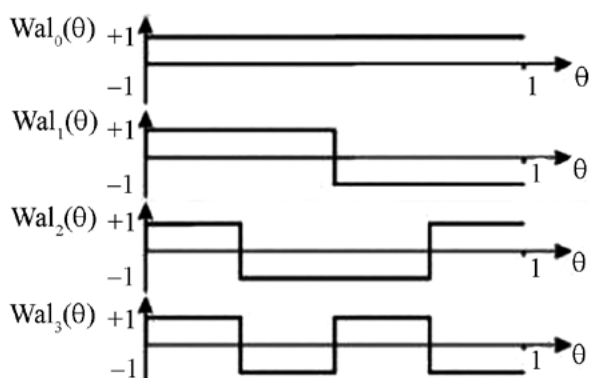
Математическая постановка задачи преобразования Уолша — Адамара

Понятие «частота» для синусоидальных функций является аналогом понятия «частотность» для функций Уолша — Адамара [3, 4]. Частотность определяется числом изменений знака функции на определенном интервале времени и характеризует обратное пространство, которое отличается от частотного пространства в гармоническом анализе [5].

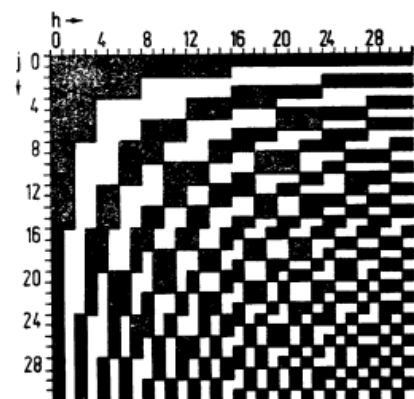
Сигнал изображения является несинусоидальным сигналом, и естественно, что для описания систем, в которых происходит преобразование несинусоидальных сигналов, более правильно использовать секвентный анализ, а не гармонический.

Функции Уолша $Wal_i(i, j)$ определяются с помощью функций Радемахера $r_j(\theta)$ следующим образом:

$$Wal(i, j)(\theta) \equiv 1;$$



а



б

Рис. 1. Представление системы функций Уолша — Адамара

а — графики первых четырех функций Уолша — Адамара; б — функции Уолша, упорядоченные по Адамару

$$\text{Wal}_i(i, j)(\theta) = \prod_{j=1}^n [r_j(\theta)]^{i_j}.$$

В статье применена система функций Уолша с упорядочением по Адамару, где базисные функции классифицируются по частотным характеристикам: их порядок определяется количеством пересечений нулевого уровня на заданном интервале, то есть по частотности. На рис. 1 представлено графическое изображение функций Уолша — Адамара.

Получение двухмерного спектра Уолша — Адамара изображения происходит в 4 этапа:

1. Вычисление одномерного спектра Уолша $B(i, j)$ путем умножения матрицы Уолша — Адамара $\text{Wal}(i, j)$ на матрицу исходного изображения $A(i, j)$; $i, j = \overline{0, N-1}$; $N = 2^n$; n — натуральное число:

$$B(i, j) = \text{Wal}(i, j) A(i, j).$$

2. Вычисление транспонированной матрицы $C(i, j)$:

$$C(i, j) = B^T(i, j).$$

3. Вычисление ненормированного двухмерного спектра Уолша-Адамара $D(i, j)$:

$$D(i, j) = C(i, j) \text{Wal}(i, j).$$

4. Нормирование полученной матрицы:

$$F(i, j) = \frac{D(i, j)}{N}.$$

Математический аппарат преобразования Уолша — Адамара, адаптированный для анализа аэро съемки земной поверхности, закладывает основу для количественной оценки линейных искажений через анализ спектральных характеристик.

Алгоритм оценки линейных искажений изображения

Предлагаемый в статье алгоритм оценки линейных искажений изображения основан на анализе диагонального распределения спектра Уолша — Адамара. Проведенный анализ секвентных спектров различных изображений показал, что существует корреляция между субъективным

восприятием линейных искажений и характером распределения яркости пикселей вдоль главной диагонали спектрального представления изображения. В частности, изображения с выраженными искажениями демонстрируют менее равномерное снижение диагональных значений интенсивности, что позволяет использовать данный признак в качестве количественного индикатора искажений.

На основе вышеизложенного предложен количественный абсолютный показатель линейных искажений QILD (Quantitative Indicator of Linear Distortion), который измеряет степень неравномерности диагонального распределения интенсивности пикселей на основе вычисления плавности градиента спектра изображения.

Метрика QILD рассчитывается на основе градиентного представления изображения, полученного с помощью оператора Собеля [6]. Алгоритм предполагает свертку исходных данных с ортогональными ядрами (горизонтальным и вертикальным), что позволяет вычислить аппроксимации частных производных (G_x , G_y) в каждой точке. Результирующие градиентные карты отражают локальные изменения яркости по соответствующим направлениям, формируя основу для количественной оценки пространственных искажений.

$$G_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * F(i, j);$$

$$G_y(i, j) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * F(i, j),$$

где знак «*» обозначает операцию двухмерной свертки;

$F(i, j)$ — спектр исходного изображения;

$G_x(i, j)$ и $G_y(i, j)$ — частные производные по горизонтали и вертикали соответственно.

Амплитуда градиента G в каждой точке определяется через евклидову норму частных производных $G_x(i, j)$ и $G_y(i, j)$:

$$G(i, j) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}.$$

Для количественной оценки линейных искажений применяется метод кумулятивного усреднения, при котором среднее значение градиентов вычисляется последовательно с накоплением данных вдоль главной диагонали изображения. Кумулятивное усреднение предполагает, что на каждом шаге рассчитывается среднее всех градиентных значений от начальной до текущей точки диагонали. Это позволяет постепенно интегрировать информацию о локальных изменениях яркости. Формально процесс описывается выражением

$$H[i] = \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^N G[k],$$

где $G[k]$ — амплитуда градиента в k -й точке диагонали;

$H[i]$ — текущее среднее значение для первых $i+1$ точек;

N — общее количество точек на диагонали;

$k = (0, N-1)$.

Итоговый показатель качества изображения QILD определяется как финальное значение вектора H : $QILD = H[N-1]$, где N — общее количество точек на диагонали.

На рис. 2 представлено математическое описание ключевых вычислительных операций, которое формализует логику работы метода, включая построение градиентной карты спектра, расчет усредненного диагонального значения и определение количественного показателя линейных искажений изображения с целью строгого обоснования корректности его работы на основе математических выражений. Математическое описание реализовано в виде программы, разработанной на языке Python [7]. Предложенный алгоритм оценки линейных искажений использует анализ диагонального распределения спектра Уолша — Адамара через метрику QILD. На основе оператора Собеля вычисляются градиенты яркости, преобразуемые в амплитудные карты, что позволяет количественно оценить неравномерность изменений вдоль главной диагонали. Метод кумулятивного усреднения интегрирует локальные отклонения, формируя итоговый показатель QILD, коррелирующий с визуальным восприятием искажений.

Результаты моделирования

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма было проведено моделирование, в процессе которого вычислялись значения предложенного показателя QILD для изображений с различными уровнями искажений, а также проводился сравнительный анализ значений яркости пикселей спектра изображения. На рис. 3 и 4 представлен результат применения преобразования Уолша — Адамара к неискаженному и искаженному изображениям.

Результаты исследования свидетельствуют, что высококачественные изображения характеризуются плавным градиентом яркости вдоль диагонали спектра, в то время как искаженные данные проявляют выраженную блочную структуру. Указанные различия позволяют использовать спектральные паттерны в качестве объективного индикатора уровня артефактов. Нарушение плавности диагонального градиента и усиление «блочности» при увеличении размытия демонстрируют прямую корреляцию с деградацией визуального качества.

Зависимость визуального восприятия качества изображения от степени искажений представлена на графике (рис. 5) сплошной синей кривой, соответствующей метрике QILD. Метрика QILD является количественной оценкой качества анализируемого изображения, измеряемой в процентах. Для верификации результатов красной пунктирной линией обозначена интегральная субъективная оценка, полученная с помощью тестирования. Сопоставление кривых подтверждает согласованность объективных расчетов с визуальным восприятием.

Экспериментальные результаты подтвердили эффективность алгоритма: метрика QILD продемонстрировала прямую корреляцию с субъективной оценкой качества изображения. Спектры неискаженных данных отличаются плавным диагональным градиентом яркости, тогда как искаженные изображения проявляют блочную структуру спектра. Сравнение кривых QILD и визуальных оценок выявило высокую согласованность, обосновывая применимость метода для объективного анализа линейных искажений аэроснимков.

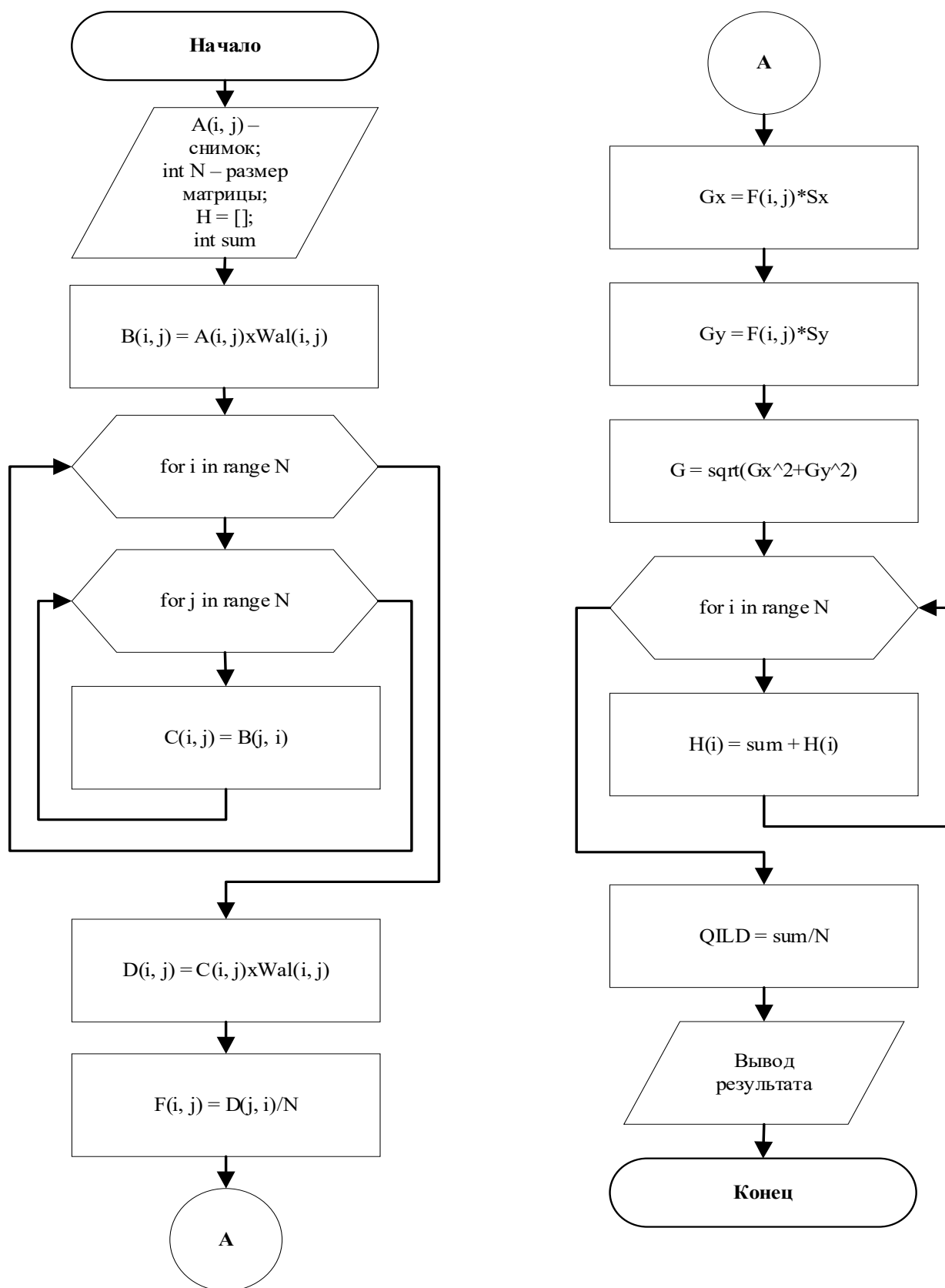


Рис. 2. Алгоритм вычислительных операций

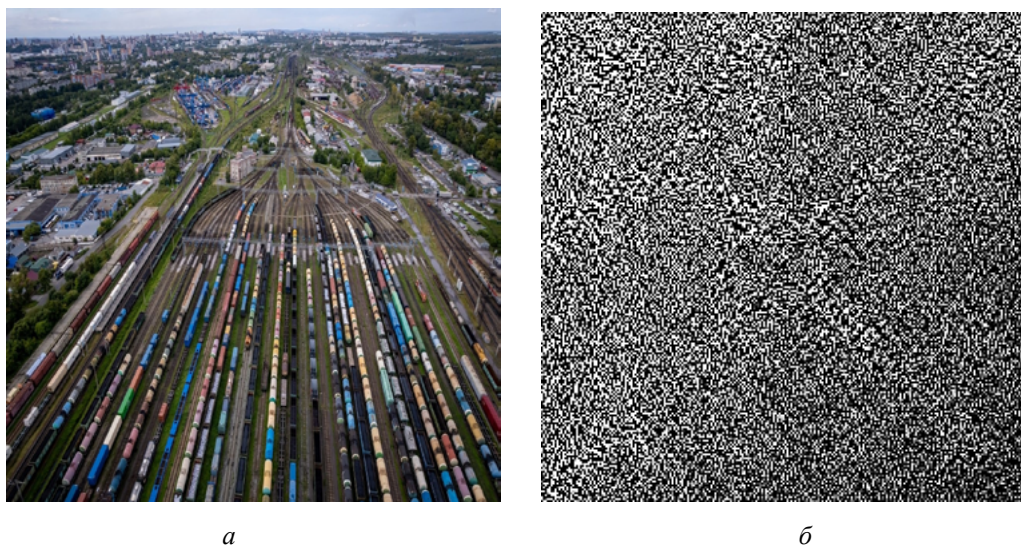


Рис. 3. Применение преобразования Уолша — Адамара к неискаженному изображению: *а* — неискаженное изображение; *б* — яркости пикселей спектра неискаженного изображения

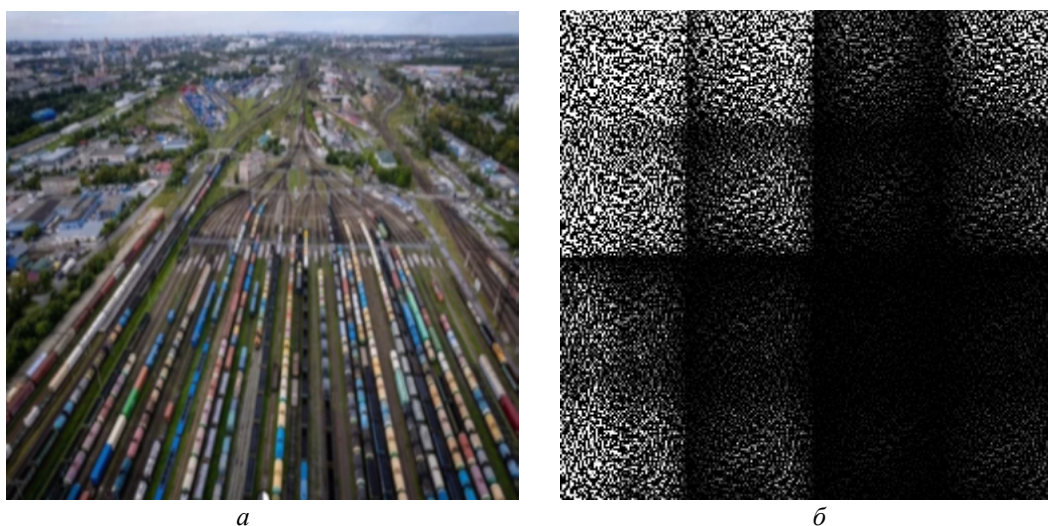


Рис. 4. Применение преобразования Уолша — Адамара к искаженному изображению: *а* — искаженное изображение; *б* — яркости пикселей спектра искаженного изображения

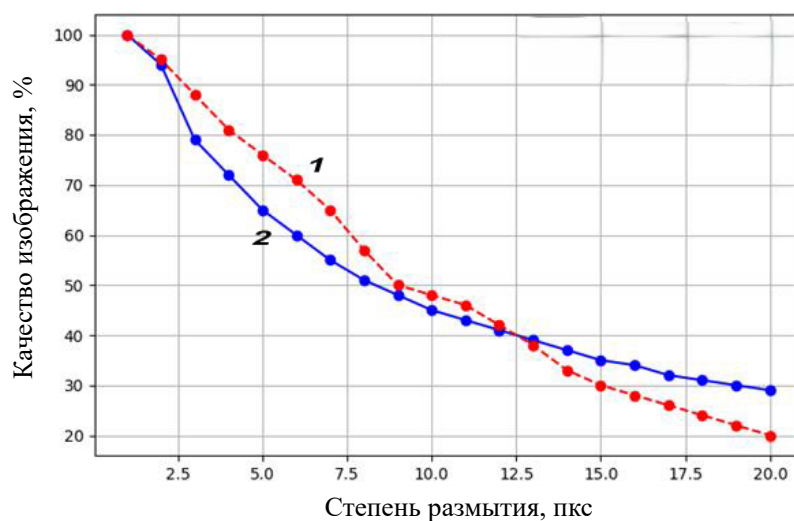


Рис. 5. Анализ зависимости результатов оценки от степени размытия изображения и сравнение результатов с субъективной оценкой качества

Заключение

В статье предложен алгоритм оценки линейных искажений снимков объектов ОАО «РЖД», основанный на комбинации двумерного преобразования Уолша — Адамара и последующего анализа его спектра. Ключевым элементом метода стал количественный показатель QILD, вычисляемый через оператор Собеля и кумулятивное усреднение амплитуд градиентов вдоль главной диагонали спектра. Это позволило формализовать связь между неравномерностью распределения яркости пикселей и визуальным восприятием артефактов.

Экспериментальная верификация подтвердила, что QILD демонстрирует устойчивую зависимость

от степени линейных искажений: снижение значения метрики коррелирует с усилением блочной структуры спектра и деградацией качества изображения. Сравнение с субъективными оценками выявило высокую согласованность результатов, что подтверждает адекватность подхода для автоматизированного анализа. Реализация алгоритма в среде Python обеспечила воспроизводимость и масштабируемость метода для обработки больших массивов данных.

Дальнейшие исследования направлены на реализацию автоматического обнаружения линейных искажений и дефектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Головина Л. А., Шляхова М. М. Цифровая обработка изображений: учебное пособие. Новосибирск: Сибирский гос. ун-т геосистем и технологий, 2020. 51 с.
2. Мельканович А. Ф. Основы аэрофотографии. Ч. 2. Принципы построения, анализ и синтез аэрофотоаппаратов. М.: М-во обороны СССР, 1975. 182 с.
3. Хармут Х. Ф. Теория секвентного анализа: основы и применения = Sequency Theory. Foundations and Applications / пер. с англ. Л. М. Сороко. М.: Мир. Редакция литературы по новой технике, 1980. 574 с.
4. Трахтман А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. М.: Советское радио, 1972. 352 с.
5. Юнаковский А. Д. Гармонический анализ. Ряды Фурье, преобразование Фурье и приложения БПФ. Долгопрудный: Интеллект, 2024. 264 с.
6. Оператор Собеля // Википедия. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Оператор_Собеля (дата обращения: 19.05.2024).
7. Васильев А. Н. Программирование на Python в примерах и задачах. М.: Эксмо, 2021. 619 с.

Дата поступления: 25.08.2025

Решение о публикации: 28.08.2025

Method for Assessing the Quality of Images Generated by Remote Monitoring Devices for Rolling Stock and Railway Tracks

Evgeny I. Shabakov — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Optical-Electronic Control Means. Research interests: image processing, machine vision, diagnostics of railway infrastructure. E-mail: eish@bk.ru

Nikita O. Kurenkov — Cadet at the Department Optical-Electronic Control Means. Research interests: image processing, remote sensing data quality assessment, machine vision. E-mail: kurenkov_2003@list.ru

Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, Russia, 197198

For citation: Shabakov E. I., Kurenkov N. O. Method for Assessing the Quality of Images Generated by Remote Monitoring Devices for Rolling Stock and Railway Tracks. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 3 (43), Pp. 33–40. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-33-40. (In Russian)

Abstract. *The application of the two-dimensional Walsh-Hadamard transform is considered to evaluate the quality of images generated by remote monitoring devices for rolling stock and railway tracks. **Purpose:** to analyze the uneven distribution of the pixel spectrum intensity along the diagonal. This will facilitate a quantitative assessment of the degree of linear distortion in images of facilities belonging to “Russian Railways” JSC. **Methods:** image spectrum analysis by Walsh-Hadamard transformation. **Results:** the applicability of the proposed method for assessing the severity of linear distortions has been demonstrated. **Practical significance:** the proposed method can be applied for detecting various types of linear distortions, with the possibility of its subsequent implementation into automatic detection algorithms.*

Keywords: *image quality assessment, Walsh-Hadamard transformation, two-dimensional image spectrum, Sobel operator, remote control, rolling stock, railway tracks, defects, diagnostics*

REFERENCES

1. Golovina L. A., Shlyakhova M. M. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy: uchebnoe posobie [Digital image processing: a tutorial]. Novosibirsk, Siberian State University of Geosystems and Technologies, 2020, 51 p. (In Russian)
2. Melkanovich A. F. Osnovy aerofotografii. Printsipy postroeniya, analiz i sintez aerofotoapparatov [Fundamentals of aerial photography. Principles of construction, analysis and synthesis of aerial cameras]. Moscow, Ministry of Defense of the USSR, 1975, 182 p. (In Russian)
3. Harmuth H. F. [Sequency Theory. Foundations and Applications]. Moscow, Mir Publishers, 1980, 574 p. (In Russian)
4. Trakhtman A. M. Vvedenie v obobshchennuyu spektralnuyu teoriyu signalov [Introduction to the generalized spectral theory of signals]. Moscow, Sovetskoe Radio Publishing House, 1972, 352 p. (In Russian)
5. Yunakovsky A. D. Garmonicheskiy analiz. Ryady Furiye, preobrazovanie Furiye i prilozheniya BPF [Harmonic analysis. Fourier series, Fourier transform and FFT applications]. Dolgoprudny, Intellect Publishing House, 2024, 264 p. (In Russian)
6. Operator Sobelya [Sobel Operator], *Wikipedia*. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Оператор_Собеля (accessed: May 19, 2024). (In Russian)
7. Vasilyev A. N. Programmirovaniye na Python v primerakh i zadachakh [Programming in Python in examples and tasks]. Moscow, Eksmo Publishing House, 2021, 619 p. (In Russian)

Received: 25.08.2025

Accepted: 28.08.2025

УДК 004.658

Ключевые проблемы внедрения ETL/ELT-процессов и методы их преодоления

- Битченков Дмитрий Игоревич** — магистрант 2-го курса направления 09.04.02 «Информационные системы и технологии». Научные интересы: интеграция данных, ETL/ELT-процессы, большие данные. E-mail: dmanbgu@gmail.com
- Злобина Маргарита Сергеевна** — студент бакалавриата 3-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: анализ данных, ETL/ELT-процессы, большие данные. E-mail: zzzlobina.ms@gmail.com
- Ермаков Сергей Геннадьевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: обработка данных, корпоративные хранилища данных, безопасность данных. E-mail: ermakov@pgups.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Битченков Д. И., Злобина М. С., Ермаков С. Г. Ключевые проблемы внедрения ETL/ELT-процессов и методы их преодоления // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 41–48. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-41-48

Аннотация. Рассматривается проблематика использования процессов ETL и ELT в системах обработки данных. Эти процессы играют ключевую роль в интеграции и анализе данных, однако их применение сопряжено с рядом проблем, требующих научно-теоретического осмысления. **Цель:** изучение проблем, возникающих при построении систем обработки данных, включая высокие временные затраты на настройку и оптимизацию, вопросы качества данных, масштабируемости и безопасности. **Результаты:** предложены рекомендации по выбору между ETL и ELT, а также решения для оптимизации процессов, обеспечения качества и безопасности данных. **Практическая значимость:** заключается в разработке новых подходов повышения эффективности работы с корпоративными хранилищами данных. **Обсуждение:** подчеркивается необходимость оптимизации процессов ETL и ELT, повышения качества и безопасности данных, обоснованного выбора архитектуры хранилищ данных для эффективной работы с информацией.

Ключевые слова: ETL, ELT, интеграция данных, проблемы качества данных, масштабируемость, безопасность данных, выбор архитектуры, оптимизация процессов, хранилища данных

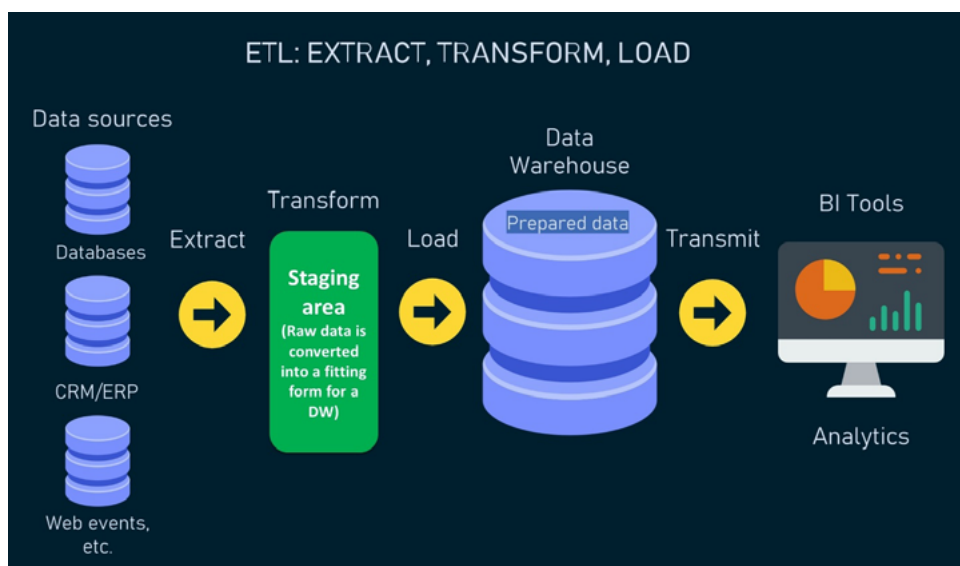
2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей; 2.3.6 — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

Введение

В современных системах обработки данных ETL- и ELT-процессы занимают важное место, выступая, по мнению исследователей, важной частью архитектуры [1]. Благодаря этим процессам компании могут собирать данные из различных источников, преобразовывать их для последующего анализа и загружать в корпоративные хранилища. Тем не менее реализация процессов обработки данных

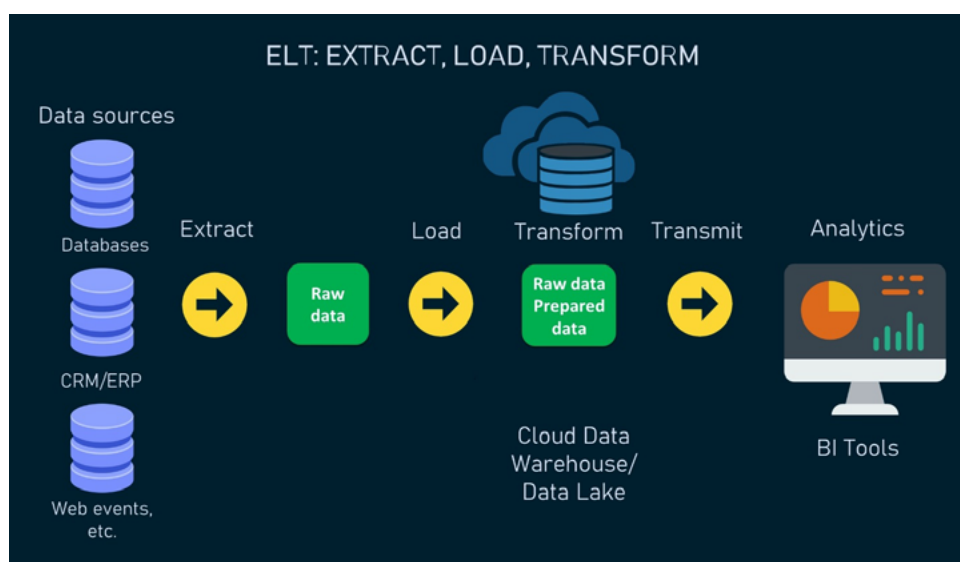
сопряжена с рядом сложностей, требующих комплексного анализа.

ETL (Extraction, Transformation, Loading) — процесс извлечения неподготовленных данных из различных источников, обработки в промежуточном хранилище и передача в единую целевую систему. Схема реализации ETL-процесса представлена на рис. 1.



Источник: <http://www.altexsoft.com/blog/etl-vs-elt>

Рис. 1. Рабочий процесс ETL



Источник: <http://www.altexsoft.com/blog/etl-vs-elt>

Рис. 2. Рабочий процесс ELT

В управлении информационными системами ETL-процессы рассматриваются как основной способ организации импорта данных [2]. В частности, инструменты ETL предназначены для интеграции данных с целью удовлетворения требований систем управления реляционными базами данных и/или традиционных хранилищ данных, поддерживающих OLAP (online analytical processing), то есть аналитическую обработку данных онлайн. Для корректной работы OLAP и запросов на языке SQL необходимо, чтобы массивы данных были стандартизованы с

помощью ряда преобразований, которые должны быть выполнены перед передачей данных в хранилище. Более того, исследователи подчеркивают и важность оптимизации самих ETL-процессов для корректного и бесперебойного импорта данных [3].

ELT (Extraction, Loading, Transformation), в свою очередь, представляет собой процесс, в котором, в отличие от ETL, иной порядок процессов: после сбора данных из источников они передаются непосредственно в центральный репозиторий, где проходят последующую обработку (рис. 2).

В целом ETL-процессы реализуются благодаря развитию аналитических платформ, способных эффективно выполнять сложные вычисления прямо на стороне хранилища данных [4].

Ключевые проблемы внедрения ETL/ELT-процессов и методы их преодоления

Среди ключевых проблем, характерных для работы с корпоративными хранилищами данных, можно выделить трудоемкость процессов извлечения и преобразования данных, требующих значительных усилий для настройки и оптимизации. Указанная проблема обостряется, если данные поступают из множества разнородных источников и имеют разные форматы — часто это приводит к задержкам получения актуальной информации и, как следствие, невозможности оперативно принимать обоснованные бизнес-решения, особенно на стороне работы аналитиков [5].

Среди современных ETL- и ELT-инструментов (Talend, AWS Glue, Informatica, Apache NiFi) есть решения, позволяющие компаниям извлекать и обрабатывать данные и в результате сокращать затраты на ресурсы благодаря автоматизации процессов. Дополнительное снижение времени развертывания обеспечивается внедрением стандартизированных шаблонов преобразования данных, а производительность увеличивается за счет использования облачных технологий с готовыми коннекторами для распространенных источников данных.

Другой сложностью выступает обеспечение качества данных. Исходные наборы данных часто содержат противоречивые записи, пропущенные или ошибочные значения, которые при недостаточном контроле приводят к передаче некорректной информации в хранилище данных. Построение аналитических выводов на основе таких данных делает их недостоверными, что снижает эффективность бизнес-процессов. Например, отсутствие проверки и очистки данных на этапе передачи при реализации проекта для крупного ретейлера повлекло за собой замедление процесса анализа из-за накопления 15 % дублирующихся записей в целевой системе [6].

Эффективным способом обеспечения качества данных являются системы Data Quality Management, которые представляют собой набор практик по контролю, повышению и поддержанию качества данных в организации [7]. Такие системы автоматизируют процессы выявления и исправления ошибок, минимизируют риски появления ошибочных данных за счет правил проверки и очистки данных на этапе преобразования, обеспечивают регулярный аудит и мониторинг качества данных. Например, использование Apache NiFi позволяет автоматизировать проверку данных с помощью встроенных процессоров, таких как ValidateRecord и DetectDuplicate. В одном из проектов для финансовой компании внедрение таких инструментов сократило количество ошибок на 30 %. Исследователи подчеркивают, что Apache NiFi является одним из наиболее эффективных решений на рынке на сегодняшний день [8].

Также в качестве проблемы следует выделить масштабируемость ETL и ELT-процессов, обусловленную ростом объема данных и численности их источников. Игнорирование этой проблемы приводит к увеличению потребности организаций в вычислительных и человеческих ресурсах, увеличению затрат на поддержание и расширение информационных систем. Более того, преобразование данных на локальной инфраструктуре организаций приводит к снижению эффективности в связи с ограниченностью ресурсов. Так, обработка 1 ТБ данных на локальных серверах телекоммуникационной компании при работе над проектом для этой организации могла занимать более 12 часов. Для нивелирования описанной проблемы целесообразно использовать облачные сервисы: AWS Glue, Azure, Google Cloud. Кейс-анализ, проведенный в ходе настоящего исследования, свидетельствует о том, что в корпоративных информационных системах время обработки 1 ТБ данных после перехода на AWS Glue может быть сокращено до 2 часов благодаря использованию распределенных вычислений, а стоимость поддержки информационной инфраструктуры снижается за счет масштабирования ресурсов в зависимости от уровня нагрузки на облачных платформах.

Таблица 1

Сравнение преимуществ и недостатков подходов ETL и ELT

Критерии	ETL	ELT
Скорость обработки	Медленнее для больших объемов данных	Быстрее благодаря использованию мощностей целевой системы
Гибкость	Ограничена этапом трансформации	Высокая, так как трансформация выполняется после загрузки
Сложность реализации	Высокая, требует мощных серверов	Низкая, использует ресурсы облачных платформ
Стоимость	Высокая в связи с затратами на инфраструктуру	Сравнительно более низкая благодаря использованию облачных ресурсов

Также стоит обратить внимание на безопасность данных. ETL- и ELT-процессы неотрывно связаны с трансфером чувствительной информации между различными системами, что приводит к рискам утечек данных и несанкционированного доступа. В результате организация может столкнуться с серьезными финансовыми последствиями. Например, утечка данных в одной из крупных компаний в 2021 году повлекла за собой штраф в размере \$ 5 млн за нарушение общего регламента по защите данных (General Data Protection Regulation, GDPR).

Для снижения вероятности возникновения описанных рисков компаниям требуется реализация надежных механизмов защиты данных на всех этапах работы с ними, включая шифрование при передаче и хранении данных, регулярные аудиты безопасности систем и тестирование на наличие уязвимостей, а также внедрение систем авторизации и аутентификации (Identity and Access Management, IAM). В качестве примера можно привести облачную систему хранения Amazon S3, которая обеспечивает шифрование данных как на уровне сервера, так и на уровне клиента благодаря использованию AES-256. Дополнительно необходимо упомянуть обязательное соответствие стандартам (GDPR, HIPAA, ISO 27001) единых корпоративных хранилищ данных. Исследователи подчеркивают необходимость внимательного отношения к рискам при выборе программных продуктов для данных целей, особенно в условиях ограниченного использования зарубежного ПО и тенденции к его импортозамещению [9].

Наконец, проблемным может стать выбор между внедрением ETL и ELT, так как требует содержательного анализа требований компаний,

архитектуры данных и уже используемых технологий. Оба решения имеют свои преимущества и недостатки, вследствие чего неправильный выбор может привести к снижению производительности бизнес-процессов, увеличению количества затрачиваемых ресурсов и, как следствие, ухудшению качества аналитики.

Для выбора оптимальной методологии организациям целесообразно провести многоаспектную оценку потребностей с учетом специфики корпоративной информационной системы и фокусируемых в ней данных [10]. ETL-процесс подойдет в случае необходимости сложных преобразований на небольших объемах данных. ELT следует внедрять в случае работы с большими объемами данных, при наличии цели обеспечения гибкости информационной системы за счет разделения этапов загрузки данных и их последующей трансформации. Также можно использовать комплексный подход, при котором часть информации проходит через ETL-процесс, в то время как другая часть — через ELT. Основные преимущества и недостатки каждого решения приведены в табл. 1.

Так, для небольших объемов данных (до 100 ГБ) ETL может быть более подходящим, поскольку позволяет выполнять сложные преобразования до загрузки. В свою очередь, для больших объемов данных (свыше 1 ТБ) ELT предпочтительнее, так как использует вычислительные мощности целевой системы, такие как Snowflake, BigQuery или Redshift.

При наличии потребности быстрой обработки данных ELT может быть более эффективным, так как загрузка данных происходит без предварительной трансформации. ETL же подходит для сце-

нариев, при которых критически важна точность данных перед загрузкой.

Также для сложных преобразований, требующих значительных вычислительных ресурсов, ETL может быть более подходящим в силу возможности выполнять их на этапе трансформации. ELT же лучше подходит для простых или инкрементальных преобразований, которые можно выполнить после загрузки данных.

В целом ELT является более экономичным решением, так как использует облачные ресурсы и не требует мощных локальных серверов, что актуально для организаций в условиях нестабильности экономической среды и явной потребности в оптимизации финансовых издержек: кейсы показывают, что ELT может существенно снизить затраты на инфраструктуру (до 25 %). ETL как альтернатива требует значительных инвестиций в инфраструктуру, особенно для обработки больших объемов данных: здесь важен системный предварительный анализ экономической целесообразности интеграции.

Практические рекомендации при реализации ETL- и ELT-процессов

Опираясь на результаты проведенного исследования, можно заключить, что для автоматизации и мониторинга ETL- и ELT-процессов приоритетно использование таких инструментов, как Apache Airflow, Talend или Informatica. В частности, Airflow позволяет создавать сложные рабочие процессы (DAGs), отслеживать их выполнение в реальном времени.

Для регулярного аудита данных рекомендуется внедрение системы контроля качества данных, приоритетные варианты — Great Expectations, Deequ или Dataiku. Указанные инструменты помогают выявлять аномалии, дубликаты и некорректные данные на ранних этапах.

Также целесообразным видится обучение сотрудников современным технологиям и стандартам безопасности в рамках курсов по облачным платформам (AWS, Azure, GCP) и инструментам ETL и ELT (Talend, Informatica, dbt).

Следует отметить, что регулярное тестирование процессов и их оптимизация способствует повышению производительности: использование инкрементальной загрузки данных вместо полной загрузки может значительно сократить время обработки, поэтому важно обеспечить непрерывность процесса мониторинга. В ходе исследования было установлено, что при реализации проекта построения хранилища данных крупной телекоммуникационной компании обработка 2 ТБ данных занимала более 24 часов на локальной инфраструктуре, тогда как после перехода на ELT с использованием Google BigQuery время обработки сократилось до 3 часов, а затраты на инфраструктуру снизились на 40 %. Также при реализации схожего проекта для одной из крупных финансовых компаний наблюдалась проблема низкого качества данных из-за отсутствия проверки на этапе загрузки. Решить эту проблему позволило внедрение Apache NiFi для автоматической валидации данных: численность ошибок сократилась на 50 %.

Заключение

Процессы ETL и ELT стали неотъемлемой частью инфраструктуры работы с данными, однако их реализация сопряжена с проблемами, систематизированными в рамках данного исследования. Для повышения эффективности работы с информацией организациям важно не только оптимизировать эти процессы, но и обеспечить должный уровень качества и безопасности данных, обоснованно выбирать решения в области построения архитектуры хранилищ данных.

Рациональный выбор между подходами ETL и ELT, наряду с их корректной реализацией, способен существенно улучшить управление данными, повысить точность аналитики и сократить издержки. В условиях стремительного роста объемов информации особое значение приобретает гибкость систем и готовность к их адаптации, что требует от специалистов постоянного обновления знаний и профессиональных навыков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Остудина К. А., Киреев В. С. Архитектура хранения и обработки текстовых открытых данных // Интеллектуальные технологии в науке и образовании: материалы Международной научно-практической конференции (Новочеркасск, Россия, 24–25 ноября 2023 г.). Новочеркасск: Лик, 2023. С. 102–108.
2. Соколов В. А., Пономарева К. А. ETL-процессы как способ организации импорта данных для обеспечения функций управления / В. А. Соколов, К. А. Пономарева; науч. рук. Р. И. Кузьмич // Проспект Свободный — 2023: материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Красноярск, Россия, 24–29 апреля 2023 г.). Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2023. С. 3350–3353.
3. Упаева П. В. Оптимизация ETL-процессов: обзор отечественного рынка // Вестник науки. 2024. № 6 (75), Т. 4. С. 1218–1224.
4. Пьянзин А. М., Лайша А. К., Аносов М. С. Обзор современных решений для хранения и структурирования данных в аддитивных технологиях // Технологии аддитивного производства. 2025. Т. 3, № 1. С. 43–48.
5. Блохин В. В., Лосев В. С. Автоматизация процесса актуализации данных в витринах: как упростить работу аналитиков // Финансовая экономика. 2024. № 10. С. 100–103.
6. Тавторкин Н. О., Куляшова Н. М. ETL-процессы в работе с данными // Будущее науки — 2024: сборник научных статей 11-й Международной молодежной научной конференции (Курск, Россия, 18–19 апреля 2024 г.): в 5 т. Т. 4. Курск: Университетская книга, 2024. С. 175–178.
7. Макаров В. В., Волчик О. В. Управление данными в системах менеджмента качества // Экономика и качество систем связи. 2024. № 4 (34). С. 4–13.
8. Лабинский А. Ю. Программные средства обработки больших объемов данных // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 4. С. 45–52. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-4-45-52.
9. Мандрика О. С., Ермаков С. Г. Модели построения корпоративного хранилища данных // Информатизация и связь. 2024. № 2. С. 22–26. DOI: 10.34219/2078-8320-2024-15-2-22-26.
10. Яковенко Е. С. Основные понятия и примеры программных инструментов в сфере обработки больших данных // Научные исследования в современном мире: опыт, проблемы и перспективы развития: сборник научных статей по материалам XIV Международной научно-практической конференции (Уфа, Россия, 19 апреля 2024 г.). Уфа: НИЦ Вестник науки, 2024. С. 563–567.

Дата поступления: 25.08.2025

Решение о публикации: 02.09.2025

Key Challenges of Implementing ETL/ELT Processes and Methods to Overcome Them

- | | |
|-----------------------------|--|
| Dmitry I. Bitchenkov | — 2nd year Master's Degree Student in 09.04.02 Information Systems and Technologies. Research interests: data integration, ETL/ELT processes, big data. E-mail: dmanbgu@gmail.com |
| Margarita S. Zlobina | — 3rd year Bachelor's Degree in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: data mining, ETL/ELT processes, big data. E-mail: zzzlobina.ms@gmail.com |
| Sergey G. Ermakov | — D. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Information and Computing Systems Department. Research interests: data processing, corporate data warehouses, data security. E-mail: ermakov@pgups.ru |

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Bitchenkov D. I., Zlobina M. S., Ermakov S. G. Key Challenges of Implementing ETL/ELT Processes and Methods to Overcome Them. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 3 (43), Pp. 41–48. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-41-48. (In Russian)

Abstract. *This paper examines the challenges associated with the use of ETL and ELT processes within data processing systems. These processes are of pivotal significance in the realms of data integration and analysis. However, a number of challenges that necessitate a robust foundation in scientific and theoretical understanding accompanies the implementation of these processes. **Purpose:** to examine the challenges associated with the development of data processing systems, with a particular focus on the significant time input associated with configuration and optimization, and issues concerning data quality, scalability, and security. **Results:** a number of recommendations and solutions have been proposed for choosing between ETL and ELT, for the optimization of processes, and for insured data quality and security. **Practical significance:** new approaches have been developed to improve the efficiency of work with corporate data storage. **Discussion:** the necessity to optimize ETL and ELT processes, to improve data quality and security, and to make a justified choice of data storage architecture for effective information management is emphasized.*

Keywords: ETL, ELT, data integration, data quality issues, scalability, data security, architecture selection, process optimization, data storage

REFERENCES

1. Ostudina K. A., Kireev V. S. Arkhitektura khraneniya i obrabotki tekstovykh otkrytykh dannykh [Architecture of Storage and Processing of Textual Open Data], *Intellektualnye tekhnologii v nauke i obrazovanii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Intelligent Technologies in Science and Education: Materials of the International Scientific and Practical Conference], Novocherkassk, Russia, November 24–25, 2023. Novocherkassk, Lik Publishing House, 2023, Pp. 102–108. (In Russian)
2. Sokolov V. A., Ponomareva K. A. ETL-protsessy kak sposob organizatsii importa dannykh dlya obespecheniya funktsiy upravleniya [ETL processes as a way of organizing data import to ensure management functions], *Prospekt Svobodnyy — 2023: materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Prospect Svobodnyy — 2023: Proceedings of the XIX International Scientific Conference for Undergraduate, Postgraduate, PhD Students and Early Career Researchers], Krasnoyarsk, Russia, April 24–29, 2023. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2023, Pp. 3350–3353. (In Russian)
3. Upaeva P. V. Optimizatsiya ETL-protsessov: obzor otechestvennogo rynka [Optimization of ETL Processes: An Review of the Domestic Market], *Vestnik Nauki*, 2024, No. 6 (75), Vol. 4. Pp. 1218–1224. (In Russian)
4. Pyanzin A. M., Laisha A. K., Anosov M. S. Obzor sovremennykh resheniy dlya khraneniya i strukturirovaniya dannykh v additivnykh tekhnologiyakh [Overview of Modern Solutions for Data Storage and Structuring in Additive Technologies], *Tekhnologii additivnogo proizvodstva* [Additive Fabrication Technologies], 2025, Vol. 3, No. 1, Pp. 43–48. (In Russian)
5. Blokhin V. V., Losev V. S. Avtomatizatsiya protsessa aktualizatsii dannykh v vitrinakh: kak uprostit rabotu analitikov [Automation of the Process of Data Acquisition in Storefronts: How to Simplify the Work of Analysts], *Finansovaya ekonomika* [Financial Economics], 2024, No. 10, Pp. 100–103. (In Russian)
6. Tavtorkin N. O., Kulyashova N. M. ETL-protsessy v rabote s dannymi [ETL processes in working with data], *Budushchee nauki — 2024: sbornik nauchnykh statey 11-y Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii* [The Future of Science — 2024: Collection of Scientific Articles of the 11th International Youth Scientific Conference], Kursk, Russia, April 18–19, 2024, Vol. 4. Kursk, Universitetskaya Kniga Publishing House, 2024, Pp. 175–178. (In Russian)

7. Makarov V. V., Volchik O. V. Upravlenie dannymi v sistemakh menedzhmenta kachestva [Data Management in Quality Management Systems], *Ekonomika i Kachestvo Sistem Svyazi*, 2024, No. 4 (34), Pp. 4–13. (In Russian)
8. Labinskiy A. Yu. Programmnye sredstva obrabotki bolshikh obemov dannykh [Processing Software Big Data], *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) [Natural and Man-Made Risks (Physico-Mathematical and Applied Aspects)]*, 2024, No. 4, Pp. 45–52. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-4-45-52. (In Russian)
9. Mandrika O. S., Ermakov S. G. Modeli postroeniya korporativnogo khranilishcha dannykh [Models for Building an Enterprise Data Warehouse], *Informatizatsiya i svyaz [Informatization and Communication]*, 2024, No. 2, Pp. 22–26. DOI: 10.34219/2078-8320-2024-15-2-22-26. (In Russian)
10. Yakovenko E. S. Osnovnye ponyatiya i primery programmnykh instrumentov v sfere obrabotki bolshikh dannykh [Basic concepts and examples of software tools in the field of big data processing], *Nauchnye issledovaniya v sovremennoy mire: opyt, problemy i perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh statey po materialam XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Scientific Research in the Modern World: Experience, Problems and Development Prospects: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference]*, Ufa, Russia, April 19, 2024. Ufa, NIC Vestnik Nauki Publishing House, 2024, Pp. 563–567. (In Russian)

Received: 25.08.2025

Accepted: 02.09.2025

УДК 004.652.4:004.65

Особенности применения партиционирования по дискретным значениям в СУБД PostgreSQL

Забродин Андрей Владимирович — канд. ист. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: системы управления базами данных, технологии хранения и обработки больших данных. E-mail: zabrodin@pgups.ru

Сабиров Никита — студент 3-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: системы управления базами данных, технологии хранения и обработки больших данных, производительность СУБД. E-mail: nikita.sabirov.30@gmail.com

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Забродин А. В., Сабиров Н. Особенности применения партиционирования по дискретным значениям в СУБД PostgreSQL // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 49–57. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-49-57

Аннотация. *С ростом объемов обрабатываемых данных в информационных системах возрастает потребность в использовании методов, обеспечивающих масштабируемость, высокую производительность и эффективное администрирование. Одним из таких методов является партиционирование таблиц — логическое разделение данных на независимые сегменты, способствующее оптимизации выполнения запросов и упрощению управления большими таблицами. Цель: исследование особенностей применения партиционирования по дискретным значениям (list partitioning) в СУБД PostgreSQL и оценка его влияния на производительность SQL-запросов. Результаты: представлены теоретические основы list partitioning, его синтаксическая реализация и ограничения. Проведен сравнительный эксперимент, показавший прирост производительности при использовании партиционирования по сравнению с монолитной таблицей. Описаны типовые сценарии применения метода при работе с категоризованными данными. Практическая значимость: состоит в возможности повышения эффективности обработки запросов и администрирования крупных таблиц в PostgreSQL путем рационального проектирования структуры хранения данных с использованием list partitioning.*

Ключевые слова: партиционирование данных, PostgreSQL, list partitioning, производительность, оптимизация запросов, индексация, распределение данных, горизонтальное фрагментирование, архитектура баз данных, большие данные

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

Введение

Предметом настоящего исследования является механизм партиционирования данных по дискретным значениям (list partitioning) в системе управления базами данных PostgreSQL. Современные информационные системы оперируют постоянно растущими объемами данных, что требует не толь-

ко надежного хранения, но и высокой скорости доступа, масштабируемости и эффективности выполнения запросов.

Одним из средств достижения этих целей является партиционирование — логическое разбиение таблиц на части, каждая из которых хранится

и обрабатывается независимо. Среди различных стратегий партиционирования, реализованных в PostgreSQL, особое место занимает партиционирование по списку, позволяющее распределять строки таблицы между партициями на основании точных значений одного или нескольких атрибутов.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения производительности операций выборки, обновления и удаления данных в больших таблицах с выраженной категоризованной структурой, что характерно для таких прикладных областей, как системы управления взаимоотношениями с клиентами (Customer Relationship Management, CRM), электронная коммерция и логистика. В статье рассматриваются принципы реализации list partitioning, включая синтаксис, типовые схемы проектирования, преимущества и ограничения технологии.

Теоретическая значимость работы заключается в систематизации представлений знаний о внутреннем устройстве и особенностях функционирования механизма поведения list partitioning в PostgreSQL, а также в формализации критериев его применения. Практическая значимость выражается в проведении экспериментов на выборке данных, демонстрирующих влияние партиционирования на время выполнения запросов. Результаты исследования могут быть применены при проектировании и оптимизации баз данных в системах, работающих с большими объемами категориальных данных, таких как CRM-системы, онлайн-ритейл и логистические платформы.

Теоретические основы партиционирования в PostgreSQL

Партиционирование таблиц — это механизм логического разбиения данных на несколько физических подтаблиц (партиций), управляемых через одну родительскую таблицу [1]. Вариант листового партиционирования (list partitioning) позволяет группировать записи по дискретным значениям указанного столбца. Такая схема особенно эффективна при наличии ограниченного множества возможных значений, например типов поездов, категорий товаров, регионов и т. д. [2].

Каждая партиция в данном случае отвечает за один или несколько фиксированных значений поля, указанного в PARTITION BY LIST() при создании таблицы [3].

Одним из преимуществ использования list partitioning является возможность исключения неактуальных партиций на этапе планирования выполнения запроса (partition pruning), что позволяет существенно снизить объем обрабатываемых данных и, как следствие, повысить общую производительность системы.

Для демонстрации эффективности листового партиционирования были созданы две идентичные по структуре таблицы (рис. 1).

В таблице trains_with_partition реализовано листовое партиционирование по типу поезда (train_type). Всего создано 4 партиции (рис. 2).

Каждая партиция отвечает за фиксированный набор значений поля train_type. Такая схема позволяет PostgreSQL эффективно исключать ненужные

```
CREATE TABLE trains_no_partition (
    train_id SERIAL,
    train_number VARCHAR(10) NOT NULL,
    departure_station VARCHAR(50) NOT NULL,
    arrival_station VARCHAR(50) NOT NULL,
    departure_time TIMESTAMP NOT NULL,
    train_type VARCHAR(20) NOT NULL,
    distance_km INT NOT NULL,
    ticket_price DECIMAL(10,2) NOT NULL
);
```

a

```
CREATE TABLE trains_with_partition (
    train_id SERIAL,
    train_number VARCHAR(10) NOT NULL,
    departure_station VARCHAR(50) NOT NULL,
    arrival_station VARCHAR(50) NOT NULL,
    departure_time TIMESTAMP NOT NULL,
    train_type VARCHAR(20) NOT NULL,
    distance_km INT NOT NULL,
    ticket_price DECIMAL(10,2) NOT NULL
) PARTITION BY LIST (train_type);
```

б

Рис. 1. Создание таблиц:
а — без партиционирования; б — с партиционированием

```

CREATE TABLE trains_highspeed PARTITION OF trains_with_partition
FOR VALUES IN ('Сапсан', 'Ласточка', 'Аллегро');

CREATE TABLE trains_long_distance PARTITION OF trains_with_partition
FOR VALUES IN ('Фирменный', 'Скорый', 'Пассажирский');

CREATE TABLE trains_suburban PARTITION OF trains_with_partition
FOR VALUES IN ('Электричка', 'Экспресс');

CREATE TABLE trains_other PARTITION OF trains_with_partition
FOR VALUES IN ('Почтовый', 'Грузопассажирский', 'Ретро');

```

Рис. 2. Создание партиций для разных типов /поездов

партиции при запросах, содержащих фильтрацию по нужному полю. Например, при выполнении запроса `WHERE train_type = 'Сапсан'` будет анализироваться только партиция `trains_highspeed`.

Заполнение таблиц производилось с помощью SQL-скрипта на языке PL/pgSQL, генерирующего 1 000 000 записей в каждую таблицу, равномерно распределенных по станциям и типам поездов (рис. 3). Для повышения производительности поиска были созданы индексы на поля `train_type` и `departure_time` в обеих таблицах (рис. 4).

Индексы в PostgreSQL, как и в большинстве реляционных СУБД, по умолчанию создаются с использованием структуры **В-дерева (B-tree)**, которая обеспечивает логарифмическое время поиска, вставки и удаления. Это делает такие индексы особенно эффективными при фильтрации, сортировке и использовании операторов сравнения (`=`, `<`, `>`, `BETWEEN`, `IN` и др.).

В случае партиционированных таблиц индексы необходимо создавать отдельно для каждой партиции, поскольку каждая партиция — это физически самостоятельная таблица. Если индекс создается на родительской таблице, PostgreSQL автоматически транслирует его создание на все существующие партиции [4]. Однако при добавлении новых партиций индексы должны быть либо созданы вручную, либо настроены с использованием декларативных механизмов, обеспечивающих автоматическое наследование индексной структуры.

Преимущество индексов в контексте партиционирования заключается в том, что они

работают в сочетании с механизмом **partition pruning** — когда PostgreSQL при выполнении запроса учитывает ключ партиционирования и обращается только к тем партициям, которые могут содержать подходящие данные. Это позволяет значительно сократить объем данных, подлежащих анализу, и уменьшить общее время выполнения запроса [5].

Например, при выполнении запроса вида `WHERE train_type = 'Сапсан'` СУБД будет использовать только партицию `trains_highspeed` и соответствующий ей локальный индекс, игнорируя остальные. Таким образом, использование индексов на партициях повышает селективность, снижает время выполнения запроса, нагрузку на диск и улучшает общую масштабируемость системы при работе с миллионами записей.

Математическая модель оценки эффективности

Оценка эффективности выполнения запросов проводится на основе времени выполнения (Execution Time) и стоимости запроса (Total Cost), отображаемой оператором `EXPLAIN ANALYZE`.

Пусть:

- T_0 — время выполнения запроса на непартиционированной таблице;
- T_p — время выполнения запроса на партиционированной таблице;
- $\Delta T = T_0 - T_p$ — выигрыш во времени;
- C_0, C_p — стоимости планов выполнения соответствующих запросов.

```

DO $$
DECLARE
    station_list VARCHAR[] := ARRAY[
        'Москва', 'Санкт-Петербург', 'Новосибирск', 'Екатеринбург', 'Казань',
        'Нижний Новгород', 'Челябинск', 'Самара', 'Омск', 'Ростов-на-Дону'
    ];
    train_types VARCHAR[] := ARRAY[
        'Сапсан', 'Ласточка', 'Аллегро', 'Фирменный', 'Скорый',
        'Пассажирский', 'Электричка', 'Экспресс', 'Почтовый', 'Грузопассажирский', 'Ретро'
    ];
BEGIN
    FOR i IN 1..1000000 LOOP
        INSERT INTO trains_no_partition (
            train_number,
            departure_station,
            arrival_station,
            departure_time,
            train_type,
            distance_km,
            ticket_price
        ) VALUES (
            'T' || (1000 + (random() * 8999))::INT,
            station_list[1 + (random() * (array_length(station_list, 1) - 1))::INT],
            station_list[1 + (random() * (array_length(station_list, 1) - 1))::INT],
            CURRENT_TIMESTAMP - (random() * 365)::INT * INTERVAL '1 day',
            train_types[1 + (random() * (array_length(train_types, 1) - 1))::INT],
            (50 + (random() * 3000))::INT,
            (100 + (random() * 15000))::NUMERIC(10,2)
        );

        INSERT INTO trains_with_partition (
            train_number,
            departure_station,
            arrival_station,
            departure_time,
            train_type,
            distance_km,
            ticket_price
        ) VALUES (
            'T' || (1000 + (random() * 8999))::INT,
            station_list[1 + (random() * (array_length(station_list, 1) - 1))::INT],
            station_list[1 + (random() * (array_length(station_list, 1) - 1))::INT],
            CURRENT_TIMESTAMP - (random() * 365)::INT * INTERVAL '1 day',
            train_types[1 + (random() * (array_length(train_types, 1) - 1))::INT],
            (50 + (random() * 3000))::INT,
            (100 + (random() * 15000))::NUMERIC(10,2)
        );
    END LOOP;
END $$;

```

Рис. 3. Заполнение таблиц данными

```

-- Для обычной таблицы
CREATE INDEX idx_no_partition_train_type ON trains_no_partition(train_type);
CREATE INDEX idx_no_partition_departure_time ON trains_no_partition(departure_time);

-- Для партиционированной таблицы (автоматически создастся на всех партициях)
CREATE INDEX idx_partition_train_type ON trains_with_partition(train_type);
CREATE INDEX idx_partition_departure_time ON trains_with_partition(departure_time);

```

Рис. 4. Создание индексов

Ожидается, что при фильтрации по `train_type`, соответствующей ключу партиционирования, будет наблюдаться значительное снижение как T_p , так и C_p за счет исключения лишних партиций.

Для количественной оценки эффекта от применения партиционирования можно ввести метрику относительного ускорения:

$$\eta = \frac{T_0 - T_p}{T_0} 100, \quad (1)$$

где η — процентное улучшение производительности.

Сравнительный анализ запросов

Для оценки влияния партиционирования на производительность были выполнены три вида SQL-запросов: фильтрация по ключу партиционирования, фильтрация по полю, не участвующему в партиционировании, и агрегатные операции.

Запрос 1. Фильтрация по ключу партиционирования

На рис. 5 представлен пример выполнения запроса с фильтрацией по полю `train_type`, которое является ключом партиционирования. Благодаря механизму отсечения (*pruning*) PostgreSQL обращается только к релевантной партиции (в данном случае — `trains_highspeed`).

Запрос 2. Фильтрация по дате (не ключ партиционирования)

На рис. 6 представлен план выполнения запроса с фильтрацией по непартиционируемому полю `departure_time`.

Запрос 3. Агрегация по типу поезда

Рис. 7 демонстрирует план агрегатного запроса с группировкой по `train_type`. Благодаря партицио-

```
-- Обычная таблица
EXPLAIN ANALYZE
SELECT * FROM trains_no_partition
WHERE train_type = 'Сапсан';

-- Партиционированная таблица
EXPLAIN ANALYZE
SELECT * FROM trains_with_partition
WHERE train_type = 'Сапсан';
```

Рис. 5. План выполнения запроса с фильтрацией по ключу партиционирования (`train_type`)

нированию [6] PostgreSQL может обрабатывать каждую партицию независимо, что особенно эффективно при операциях **GROUP BY** по ключу партиционирования. Это позволяет избежать полного сканирования таблицы и сократить время выполнения за счет распределенной обработки данных, что существенно сокращает общее время выполнения запроса.

Результаты выполнения запросов представлены на рис. 8. Исходя из полученных результатов, можно увидеть, что таблица, имеющая партиции, завершила работу гораздо быстрее:

- без партиционирования: Execution Time: 184,489 ms;
- с партиционированием: Execution Time: 36,639 ms.

Относительное ускорение (1) равно:

$$\eta = \frac{184,489 - 36,639}{184,489} 100 \approx 80,1 \%$$

Также можно проверить размеры данных партиций. На рис. 9 представлен запрос, определяющий размер каждой партиции и примерное количество строк.

```
-- Обычная таблица
EXPLAIN ANALYZE
SELECT * FROM trains_no_partition
WHERE departure_time BETWEEN '2023-01-01' AND '2023-01-31';

-- Партиционированная таблица
EXPLAIN ANALYZE
SELECT * FROM trains_with_partition
WHERE departure_time BETWEEN '2023-01-01' AND '2023-01-31';
```

Рис. 6. План выполнения запроса с фильтрацией по непартиционируемому полю (`departure_time`)

```
-- Обычная таблица
EXPLAIN ANALYZE
SELECT train_type, COUNT(*), AVG(ticket_price)
FROM trains_no_partition
GROUP BY train_type;

-- Партиционированная таблица
EXPLAIN ANALYZE
SELECT train_type, COUNT(*), AVG(ticket_price)
FROM trains_with_partition
GROUP BY train_type;
```

Рис. 7. План выполнения агрегатного запроса с группировкой по типу поезда

Результаты, отраженные на рис. 10, указывают на различия в объемах данных по партициям, что объем данных распределен между партициями неравномерно: наиболее загруженной оказалась `trains_long_distance`, а наименьшей — `trains_suburban`. Это свидетельствует о логичности структуры партиционирования [7].

Анализ полученных данных показывает, что каждая из партиций содержит различный объем информации как по размеру данных, так и по оценочному количеству строк. Наибольшая нагрузка приходится на партицию `trains_long_distance`, что,

	QUERY PLAN text	
1	Bitmap Heap Scan on trains_no_partition (cost=561.08..16920.49 rows=49633 width=89) (actual time=7.517..182.768 rows=49774 loops=1)	
2	Recheck Cond: ((train_type)::text = 'Cancan'::text)	
3	Heap Blocks: exact=15132	
4	-> Bitmap Index Scan on idx_no_partition_train_type (cost=0.00..548.67 rows=49633 width=0) (actual time=5.477..5.478 rows=49774 loop...	
5	Index Cond: ((train_type)::text = 'Cancan'::text)	
6	Planning Time: 2.994 ms	
7	Execution Time: 184.489 ms	

	QUERY PLAN text	
1	Bitmap Heap Scan on trains_highspeed trains_with_partition (cost=575.91..5038.80 rows=51031 width=85) (actual time=3.549..35.451 rows=50278 loop...	
2	Recheck Cond: ((train_type)::text = 'Cancan'::text)	
3	Heap Blocks: exact=3825	
4	-> Bitmap Index Scan on trains_highspeed_train_type_idx (cost=0.00..563.15 rows=51031 width=0) (actual time=2.901..2.901 rows=50278 loops=1)	
5	Index Cond: ((train_type)::text = 'Cancan'::text)	
6	Planning Time: 5.477 ms	
7	Execution Time: 36.639 ms	

Рис. 8. Результаты выполнения запросов

```
SELECT
  child.relname AS partition_name,
  pg_get_expr(child.relpartbound, child.oid) AS partition_condition,
  pg_size_pretty(pg_total_relation_size(child.oid)) AS total_size,
  pg_size_pretty(pg_relation_size(child.oid)) AS data_size,
  pg_size_pretty(pg_indexes_size(child.oid)) AS indexes_size,
  pg_class.reltuples::bigint AS estimated_rows
FROM pg_inherits
JOIN pg_class parent ON pg_inherits.inhparent = parent.oid
JOIN pg_class child ON pg_inherits.inhrelid = child.oid
JOIN pg_class ON (pg_class.oid = child.oid)
WHERE parent.relname = 'trains_with_partition'
ORDER BY partition_name;
```

Рис. 9. Запрос просмотра объема данных

	partition_name name	partition_condition text	total_size text	data_size text	indexes_size text	estimated_rows bigint
1	trains_highspeed	FOR VALUES IN ('Сапсан', 'Ласточка', 'Аллегро')	33 MB	30 MB	3544 kB	249742
2	trains_long_distance	FOR VALUES IN ('Фирменный', 'Скорый', 'Пассажирский')	41 MB	37 MB	4264 kB	299178
3	trains_other	FOR VALUES IN ('Почтовый', 'Грузопассажирский', 'Ретр...	35 MB	32 MB	3584 kB	250861
4	trains_suburban	FOR VALUES IN ('Электричка', 'Экспресс')	28 MB	25 MB	2872 kB	200219

Рис. 10. Вывод результата запроса объема данных

вероятно, обусловлено высокой востребованностью дальнемагистральных рейсов, значительным объемом сопутствующей информации, фиксируемой в базе данных, а также частотой их использования.

В то же время самая компактная по объему и количеству строк партиция — `trains_suburban`, что также логично, учитывая более короткие маршруты и, как правило, меньший объем информации по каждому рейсу.

Такое распределение позволяет сделать вывод о корректной логике партиционирования: она обеспечивает эффективное хранение и обработку данных, соответствуя особенностям каждой группы поездов.

Заключение

В результате проведенного исследования была выполнена оценка эффективности использования листового партиционирования (`list partitioning`) в PostgreSQL на примере таблицы с данными о железнодорожных поездах, классифицированных по типу.

Экспериментальные замеры производительности показали, что при выполнении выборки с фильтрацией по партиционируемому столбцу наблюдается значительное снижение времени выполнения запросов за счет механизма отсека нерелевантных секций на этапе планирования запросов (`partition pruning`).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. PostgreSQL 17 Documentation: Table Partitioning. URL: <http://www.postgresql.org/docs/17/ddl-partitioning.html> (дата обращения: 01.06.2025).
2. List Partitioning // Mastering SQL Using PostgreSQL: Online Course. URL: http://postgresql.itversity.com/05_partitioning_tables_and_indexes/03_list_partitioning.html (дата обращения: 05.06.2025).
3. Raghuwanshi R. How to Use Table Partitioning to Scale PostgreSQL // EDB Postgres Tutorials. 2023. 24 January. URL: <http://www.enterprisedb.com/postgres-tutorials/how-use-table-partitioning-scale-postgresql> (дата обращения: 05.06.2025).

4. PostgreSQL 17 Documentation: Index Types. URL: <https://www.postgresql.org/docs/current/indexes-types.html> (дата обращения: 01.06.2025).
5. Soto C. PostgreSQL Table Partitioning: Boosting Performance and Management // HackerNoon. 2023. 04 October. URL: <http://hackernoon.com/postgresql-table-partitioning-boosting-performance-and-management> (дата обращения: 07.06.2025).
6. Fakirpure M. PostgreSQL Queries with Table Partitions // HostnExtra Learn. Updated 27 January 2024. URL: <http://hostnextra.com/learn/paths/postgresql/postgresql-queries-with-table-partitions> (дата обращения: 07.06.2025).
7. Blackwood-Sewell J., Soto C. When to Consider Postgres Partitioning // TigerData. 2024. 04 March. URL: <https://www.tigerdata.com/learn/when-to-consider-postgres-partitioning> (дата обращения: 05.06.2025).

Дата поступления: 23.06.2025

Решение о публикации: 07.08.2025

Features of List Partitioning Application in the PostgreSQL DBMS

Andrey V. Zabrodin — PhD in History, Associate Professor of the Information and Computing Systems Department. Research interests: database management systems, big data storage and processing technologies. E-mail: zabrodin@pgups.ru

Nikita Sabirov — 3rd year Bachelor's Degree Student in 09.03.01 Informatics and Computer Technology specialism. Research interests: database management systems, big data storage and processing technologies, DBMS performance. E-mail: nikita.sabirov.30@gmail.com

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Zabrodin A. V., Sabirov N. Features of List Partitioning Application in the PostgreSQL DBMS. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 3 (43), Pp. 49–57. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-49-57. (In Russian)

Abstract. *As the volume of data processed in information systems increases, there is a growing need to use methods that ensure scalability, high performance, and efficient administration. One such method is table partitioning, which involves the logical division of data into independent segments. This process has been shown to optimize query execution and simplify the management of large tables. **Purpose:** to examine the particulars of employing list partitioning within the PostgreSQL database management system and to assess its effect on the performance of SQL queries. **Results:** the theoretical foundations of list partitioning, its syntactic implementation and limitations have been presented. A comparative experiment was conducted that demonstrated an enhancement in productivity when employing partitioning as opposed to a monolithic table. Typical scenarios of using the method when working with categorized data have been described. **Practical significance:** the efficiency of query processing and administration of large tables in PostgreSQL can be enhanced through the rational design of the data storage structure using list partitioning.*

Keywords: *data partitioning, PostgreSQL, list partitioning, performance, query optimization, indexing, data distribution, horizontal fragmentation, database architecture, big data*

REFERENCES

1. PostgreSQL 17 Documentation: Table Partitioning. Available at: <http://www.postgresql.org/docs/17/ddl-partitioning.html> (accessed: June 01, 2025).
2. List Partitioning, Mastering SQL Using PostgreSQL: Online Course. Available at: http://postgresql.itversity.com/05_partitioning_tables_and_indexes/03_list_partitioning.html (accessed: June 05, 2025).
3. Raghuwanshi R. How to Use Table Partitioning to Scale PostgreSQL, EDB Postgres Tutorials. Published online at January 24, 2023. Available at: <http://www.enterprisedb.com/postgres-tutorials/how-use-table-partitioning-scale-postgresql> (accessed: June 05, 2025).
4. PostgreSQL 17 Documentation: Index Types. Available at: <http://www.postgresql.org/docs/current/indexes-types.html> (accessed: June 01, 2025).
5. Soto C. PostgreSQL Table Partitioning: Boosting Performance and Management, HackerNoon. Published online at October 04, 2023. Available at: <http://hackernoon.com/postgresql-table-partitioning-boosting-performance-and-management> (accessed: June 07, 2025).
6. Fakirpure M. PostgreSQL Queries with Table Partitions, HostnExtra Learn. Updated January 27, 2024. Available at: <http://hostnextra.com/learn/paths/postgresql/postgresql-queries-with-table-partitions> (accessed: June 07, 2025).
7. Blackwood-Sewell J., Soto C. When to Consider Postgres Partitioning, TigerData. Published online at March 04, 2024. Available at: <https://www.tigerdata.com/learn/when-to-consider-postgres-partitioning> (accessed: June 05, 2025).

Received: 23.06.2025

Accepted: 07.08.2025

УДК 681.513.2

Линеаризация модели движения многосвязного динамического объекта методом псевдокоординатной линеаризации

Мануйлов Юрий Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, независимый исследователь. Научные интересы: управление сложными организационно-техническими объектами, оптимизация комплексов операций. E-mail: manuilov.yuriy@yandex.ru

Толоконников Андрей Валерьевич¹ — канд. техн. наук, преподаватель кафедры космического радиоэлектронного контроля. Научные интересы: управление сложными организационно-техническими объектами, эксплуатация технических систем. E-mail: andrew-tolokonnikov@rambler.ru

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Для цитирования: Мануйлов Ю. С., Толоконников А. В. Линеаризация модели движения многосвязного динамического объекта методом псевдокоординатной линеаризации // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 58–67. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-58-67.

Аннотация. *Предлагается метод линеаризации нелинейной модели управляемого движения многосвязного динамического объекта с присоединенными упругими элементами конструкции. Метод основан на использовании неособых преобразований гладких многообразий на основе известной алгебры Ли. Цель: применение хорошо разработанной теории оптимального управления линейными на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина или принципа оптимальности Р. Беллмана. Методы: рассматривается общетеоретический подход псевдокоординатной линеаризации, который затем иллюстрируется процедурой линеаризации модели управляемого углового движения телеуправляемого летательного аппарата. Практическая значимость: получена конечномерная математическая модель, применимая для решения задач синтеза оптимального, робастного и финитного управления пространственным угловым движением телеуправляемого летательного аппарата.*

Ключевые слова: нелинейные дифференциальные уравнения, псевдокоординатная линеаризация, оптимальное, робастное и финитное управление

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); **2.9.8** — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Введение

Системы наблюдения, размещенные на телеуправляемых летательных аппаратах, в настоящее время являются основным источником информации для решения расчетных и аналитических задач, связанных с наблюдением и прогнозированием различных процессов природного или техногенного характера [1].

Большой объем информации, необходимой для управления, с одновременным требованием сокращения времени на ее прохождение и обработку приводит к необходимости совершенствования информационного обмена в системе управления [2]. Важное значение для формирования эффективной системы имеет учет динамики присоединенных

упругих элементов конструкции, которые могут обладать значительными размерами.

Таким образом, для решения задачи управления движением целесообразно разработать модель, которая позволяла бы в режиме реального времени учитывать динамику присоединенных элементов при формировании управляющих воздействий.

Точная линеаризация математических моделей динамических систем

Пусть процесс управляемого движения объекта описывается системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений вида [3–6]:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{u}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t)$ — n -мерный вектор состояния (n — четное); $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ — n -мерная непрерывно дифференцируемая вектор-функция (векторное поле), определенная на $U \subset R^n$ (в общем случае — на любом дифференцируемом многообразии); $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ ($n \times m$) — матрица-функция с непрерывно дифференцируемыми компонентами ($m = n/2$); $\mathbf{u}(t) = \text{col}(u_j(t), j = \overline{1, m})$ — кусочно-непрерывная m -мерная вектор-функция управления.

Будем искать неособое преобразование системы (1) в линейную систему вида:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}^1 = \mathbf{z}^2; \\ \dot{\mathbf{z}}^2 = \mathbf{w} \end{cases}, \quad (2)$$

где $\mathbf{z}^1, \mathbf{z}^2$ — m -мерные векторы фазовых координат и фазовых скоростей;

$\mathbf{w} = \text{col}(w_i, i = \overline{1, m})$ — m -мерный вектор управлений, где w_i — кусочно-непрерывные функции.

Заметим, что соотношения (2) описывают динамику системы из m независимых двойных интеграторов.

Перепишем систему (1) в следующем эквивалентном виде:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m u_j(t) \mathbf{g}_j(\mathbf{x}),$$

где $\mathbf{g}_j(\mathbf{x}), j = \overline{1, m}$ — вектор-столбцы матрицы $\mathbf{G}(\mathbf{x})$.

Искомое линеаризующее преобразование $\mathbf{Z} = (\mathbf{z}^1, \mathbf{z}^2, \mathbf{w})$ должно обладать тем свойством, что $\mathbf{z}^1$ и $\mathbf{z}^2$ зависят только от $\mathbf{x}$, а $\mathbf{w}$ — от $\mathbf{x}$ и $\mathbf{u}$:

$$\mathbf{z}^1 = \mathbf{z}^1(\mathbf{x}); \mathbf{z}^2 = \mathbf{z}^2(\mathbf{x}); \mathbf{w} = \mathbf{w}(\mathbf{x}, \mathbf{u}). \quad (3)$$

Продифференцируем по t компоненты вектор-функций $\mathbf{z}^1(\mathbf{x})$ и $\mathbf{z}^2(\mathbf{x})$:

$$\frac{dz_i^k}{dt} = \left\langle \frac{\partial z_i^k}{\partial \mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}} \right\rangle = \left\langle \frac{\partial z_i^k}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{f}(\mathbf{x}) \right\rangle + \sum_{j=1}^m u_j \left\langle \frac{\partial z_i^k}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{g}_j(\mathbf{x}) \right\rangle, \quad (4)$$

где $k = 1, 2$; $i, j = \overline{1, m}$; $\langle \cdot, \cdot \rangle$ — обозначает скалярное произведение векторов.

Из (2) с учетом соотношений (3) и (4) следует, что

$$\left\langle \frac{\partial z_i^1}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{g}_j(\mathbf{x}) \right\rangle \equiv 0, \quad i, j = \overline{1, m},$$

и, соответственно,

$$\begin{cases} \dot{z}_i^1 = \left\langle \frac{\partial z_i^1}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{f}(\mathbf{x}) \right\rangle; \\ \dot{z}_i^2 = \left\langle \frac{\partial z_i^2}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{f}(\mathbf{x}) \right\rangle + \sum_{j=1}^m u_j \left\langle \frac{\partial z_i^2}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{g}_j(\mathbf{x}) \right\rangle = w_i, \quad i = \overline{1, m}. \end{cases} \quad (5)$$

Введем в рассмотрение математическую кон-

струкцию $[f, g] = \frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} f - \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} g$, называемую скоб-

ками Ли от f и g , где f и g — C^∞ (бесконечно дифференцируемые) гладкие векторные поля на

R^n , а также $L_f(\omega) = \left(\frac{\partial \omega^T}{\partial \mathbf{x}} f \right)^T + \omega \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}$, называемую

Ли-производной ω по направлению векторного поля f и $L_f \langle \omega, g \rangle = \langle L_f(\omega), g \rangle + \langle \omega, [f, g] \rangle$, называемую Ли-производной скалярного произведения $\langle \omega, g \rangle$ по направлению векторного поля f .

Преобразуем скалярные произведения

$$\left\langle \frac{\partial z_i^2}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{g}_j(\mathbf{x}) \right\rangle$$

к следующему виду:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\partial z_i^2}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{g}_j(\mathbf{x}) \right\rangle &= \left\langle L_f \left(\frac{\partial z_i^1}{\partial \mathbf{x}} \right), \mathbf{g}_j(\mathbf{x}) \right\rangle = \\ &= L_f \left\langle \frac{\partial z_i^1}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{g}_j(\mathbf{x}) \right\rangle - \left\langle \frac{\partial z_i^1}{\partial \mathbf{x}}, [f, \mathbf{g}_j(\mathbf{x})] \right\rangle = \\ &= - \left\langle \frac{\partial z_i^1}{\partial \mathbf{x}}, [f, \mathbf{g}_j] \right\rangle, \quad i, j = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, задача отыскания точного линейаризующего преобразования сводится к решению переопределенной системы дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\left\langle \frac{\partial z_i^1}{\partial x}, g^j(x) \right\rangle = 0, \quad i, j = \overline{1, m}, \quad (7)$$

с ограничениями

$$\left\langle \frac{\partial z_i^1}{\partial x}, [f(x), g_j(x)] \right\rangle \neq 0, \quad i, j = \overline{1, m}. \quad (8)$$

В свою очередь, решение системы (7)–(8) может быть найдено по следующей методике.

Сначала решается система обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{ds_1} = [f(x), g^1(x)], \quad s_1 \in [0, +\infty)$$

с начальными условиями $x(0) = 0$.

Затем решается система:

$$\frac{dx}{ds_2} = [f(x), g^2(x)], \quad s_2 \in [0, +\infty)$$

с начальными условиями $x(s_1, 0) = x(s_1)$.

И так далее до системы:

$$\frac{dx}{ds_m} = [f(x), g^m(x)], \quad s_m \in [0, +\infty)$$

с начальными условиями:

$$x(s_1, s_2, \dots, s_{m-1}, 0) = x(s_1, s_2, \dots, s_{m-1}).$$

После этого последовательно решаются системы:

$$\frac{dx}{dt_1} = g^1(x), \quad t_1 \in [0, +\infty), \quad x(s_1, \dots, s_m, 0) = x(s_1, \dots, s_m);$$

$$\frac{dx}{dt_2} = g^2(x), \quad t_2 \in [0, +\infty), \quad x(s_1, \dots, s_m, 0) = x(s_1, \dots, s_m);$$

...

$$\frac{dx}{dt_m} = g^m(x), \quad t_i \in [0, +\infty),$$

с начальными условиями:

$$x(s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_{m-1}, 0) = x(s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_{m-1}).$$

В результате получаем выражения для компонент x_i , $i = \overline{1, n}$ вектора состояния в функции от s_j, t_j , $j = \overline{1, m}$:

$$x_i = x_i(s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_m) \quad i = \overline{1, m}.$$

Далее необходимо проверить условия:

– несингулярность матрицы управляемости

$$[g^1 | \dots | g^m | [f, g^i] | [f^m, g^m]];$$

– инволютивность множества

$$\{g^1, \dots, g^m, [f, g^i], \dots, [f^m, g^m]\};$$

– удовлетворение матрицы Якоби

$$J_1 = \frac{D(x_1, \dots, x_n)}{D(s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_m)}$$

(характеристической матрицы) условию пропорций на $U \subset R^n$.

Определение 1. Характеристическая матрица $J(s_1, t_1, \dots, t_{n-1})$ удовлетворяет условию пропорций на $U \subset R^n$, если существует $\varepsilon > 0$ такое, что для абсолютных значений ее главных миноров $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ выполняются соотношения:

$$|\Delta_1| \geq \varepsilon, \quad \frac{|\Delta_2|}{|\Delta_1|} \geq \varepsilon, \dots, \quad \frac{|\Delta_n|}{|\Delta_{n-1}|} \geq \varepsilon$$

на всем $U \subset R^n$.

При выполнении вышеперечисленных условий преобразование координат взаимно однозначно и можно положить:

$$z_j^1 = s_j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (9)$$

Заметим, что величины z_j^1 , $j = \overline{1, m}$ в соотношении (9) могут задаваться произвольными непрерывно дифференцируемыми функциями:

$$z_j^1 = F_j(s_j), \quad j = \overline{1, m},$$

обладающими следующими свойствами:

$$F_j(0) = 0; \quad \frac{\partial F_j}{\partial s_j} \neq 0, \quad j = \overline{1, m}.$$

Соответствующие выражения для z_j^2 и w_j , $j = \overline{1, m}$ могут быть получены с использованием соотношений (5):

$$z_j^2 = \left\langle \left(\frac{\partial z_j^1}{\partial s_j} \right) \cdot \left(\frac{\partial s_j}{\partial x} \right), f(x(s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_m)) \right\rangle;$$

$$w_j = \left\langle \frac{\partial z_j^2}{\partial x}, f(x(s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_m)) \right\rangle + \\ + \sum_{k=1}^m u_k \left\langle \frac{\partial z_j^2}{\partial x}, g^k(x(s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_m)) \right\rangle, \quad j = \overline{1, m}.$$

Далее необходимо найти область U в пространстве $(s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_m)$, в которой матрица Якоби

$$J_2 = \frac{D(z_1^1, \dots, z_m^1, z_1^2, \dots, z_m^2)}{D(s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_m)}$$

удовлетворяет условию пропорций (по определению 1). Если эта область — непустое множество, то преобразование $(z_1^1, \dots, z_m^1, z_1^2, \dots, z_m^2) \rightarrow (s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_m)$ будет взаимно-однозначным на U .

Глобальное взаимно-однозначное преобразование $x \rightarrow z^1, z^2$ будет определено на пересечении B областей U и B^* :

$$B = U \cap B^*,$$

где B^* — прообраз области B при преобразовании $x \rightarrow (s_1, \dots, s_m, t_1, \dots, t_m)$.

При этом в области B соотношения для z_j^1, z_j^2 и $w_j, j = \overline{1, m}$ могут быть выражены в функции переменных $x_i, i = \overline{1, n}, u_j, j = \overline{1, m}$. Кроме того, из соотношений (5), (6), (8) следует, что выражения для $w_j, j = \overline{1, m}$ могут быть разрешены относительно $u_j, j = \overline{1, m}$.

Таким образом, задача поиска точного преобразования системы (1) в линейную систему (2) полностью решена.

Трансформация математической модели управляемого углового движения твердого тела на основе линеаризующих псевдокоординатных отображений

Применим методику точных псевдокоординатных отображений для преобразования кинематических соотношений и нелинейных динамических уравнений Эйлера, описывающих управляемое угловое движение твердого тела, к линейной форме.

Рассмотрим сначала случай, когда оси связанной системы координат совпадают с главными осями инерции твердого тела, а относительное положение связанной и опорной (базовой) систем

координат задается последовательностью углов Эйлера — Крылова [1, 5]:

$$\gamma \rightarrow \psi \rightarrow \theta.$$

При этом угловое движение твердого тела может быть описано следующей системой:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = [\omega_1 \cos(\theta) - \omega_2 \sin(\theta)] / \cos(\psi); \\ \dot{\psi} = \omega_1 \sin(\theta) + \omega_2 \cos(\theta); \\ \dot{\theta} = \omega_3 + tg(\psi)[\omega_2 \sin(\theta) + \omega_1 \cos(\theta)]; \\ \dot{\omega}_1 = a_1 \omega_2 \omega_3 + u_1(t); \\ \dot{\omega}_2 = a_2 \omega_1 \omega_3 + u_2(t); \\ \dot{\omega}_3 = a_3 \omega_1 \omega_2 + u_3(t), \end{cases} \quad (10)$$

где γ, ψ, θ — соответственно углы крена, рыскания и тангажа (углы Эйлера — Крылова);

$\omega_i, i = \overline{1, 3}$ — проекции угловой скорости вращения объекта на связанные оси;

$$a_1 = (J_2 - J_3) / J_1;$$

$$a_2 = (J_3 - J_1) / J_2;$$

$$a_3 = (J_1 - J_2) / J_3;$$

$$J_i, i = \overline{1, 3} \text{ — главные моменты инерции;}$$

$u_i, i = \overline{1, 3}$ — управляющие ускорения по связанным осям. Используя описанную выше методику, будем искать преобразование, приводящее систему (10) к линейной форме:

$$\dot{x}^1 = x^2; \quad \dot{x}^2 = v, \quad (11)$$

где $x^1 = col(x_i^1, i = \overline{1, 3}), x^2 = col(x_i^2, i = \overline{1, 3})$ — векторы фазовых координат и фазовых скоростей в пространстве преобразованных переменных; $v = col(v_i, i = \overline{1, 3})$ — вектор-функция управлений.

Необходимо найти вектор-функции x^1, x^2 и v , такие, что:

$$x^1 = x^1(\varphi, \omega); \quad x^2 = x^2(\varphi, \omega); \quad v = v(\varphi, \omega, u), \quad (12)$$

где компоненты вектора $\varphi = col(\gamma, \psi, \theta)$ непрерывно дифференцируемы по своим аргументам.

Перепишем систему (10) следующим образом:

$$\dot{\alpha} = f(\alpha) + \sum_{j=1}^3 u_j g^j, \quad (13)$$

где $\alpha = col(\varphi, \omega); g^1 = col(0, 0, 0, 1, 0, 0);$

$$g^2 = col(0, 0, 0, 0, 1, 0); \quad g^3 = col(0, 0, 0, 0, 0, 1);$$

$$f(\alpha) = \begin{bmatrix} (\omega_1 \cos(\theta) - \omega_2 \sin(\theta)) / \cos(\psi) \\ \omega_1 \sin(\theta) + \omega_2 \cos(\theta) \\ \omega_3 + tg(\psi)[\omega_2 \sin(\theta) - \omega_1 \cos(\theta)] \\ a_1 \omega_2 \omega_3 \\ a_2 \omega_1 \omega_3 \\ a_3 \omega_1 \omega_2 \end{bmatrix}.$$

Вычисляя скобки Ли

$$[f, g^j] = \frac{\partial g^j}{\partial x} f - \frac{\partial f}{\partial x} g^j, \quad j = \overline{1, 3}, \text{ находим:}$$

$$[f, g^1] = \begin{bmatrix} -\cos(\theta) / \cos(\psi) \\ -\sin(\theta) \\ tg(\psi) \cos(\theta) \\ 0 \\ -a_2 \omega_3 \\ -a_3 \omega_2 \end{bmatrix};$$

$$[f, g^2] = \begin{bmatrix} \sin(\theta) / \cos(\psi) \\ -\cos(\theta) \\ -tg(\psi) \sin(\theta) \\ -a_1 \omega_3 \\ 0 \\ -a_3 \omega_1 \end{bmatrix};$$

$$[f, g^3] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ -a_1 \omega_2 \\ -a_2 \omega_1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Разрешая систему

$$\frac{d\alpha}{ds_1} = [f, g^1], \quad s_1 \in [0, +\infty), \quad \alpha(0) = 0, \text{ находим:}$$

$$\gamma(s_1) = -s_1, \quad \psi = 0, \quad \theta = 0, \quad \omega_i = 0, \quad i = \overline{1, 3}.$$

Затем разрешаем систему:

$$\frac{d\alpha}{ds_2} = [f, g^2], \quad s_2 \in [0, +\infty), \quad \alpha(s_1, 0) = 0.$$

Продолжая процесс, приходим к последней системе:

$$\frac{d\alpha}{dt_3} = g^3, \quad t_3 \in [0, +\infty),$$

$$\alpha(s_1, s_2, s_3, t_1, t_2, 0) = \alpha(s_1, s_2, s_3, t_1, t_2),$$

решение которой дает следующие соотношения:

$$\begin{cases} \gamma = -s_1; \quad \psi = -s_2; \quad \theta = -s_3; \\ \omega_1 = t_1; \quad \omega_2 = t_2; \quad \omega_3 = t_3. \end{cases} \quad (14)$$

Характеристическая матрица (якобиан) при этом имеет вид:

$$J_1 = \text{diag}(J_{ii} = -1, i = \overline{1, 3}; J_{jj} = 1, j = \overline{4, 6}).$$

Очевидно, что она удовлетворяет условию пропорций на R^6 (например, при $\varepsilon = 1/2$). Кроме того, система векторных $\{g^1, g^2, g^3, [f, g^1], [f, g^2], [f, g^3]\}$ показателей удовлетворяет условиям существования искомого взаимно однозначного преобразования системы (10) в систему (11) в области:

$$\begin{aligned} U = \{ \alpha : \gamma \in (-\pi, \pi), \\ \psi \in (-\pi/2, \pi/2), \\ \theta \in (-\pi/2, \pi/2), \\ \forall \omega_i, i = \overline{1, 3} \}. \end{aligned}$$

Зададим параметры $x_i^1, i = \overline{1, 3}$ следующим образом:

$$x_i^1 = -s_i, \quad i = \overline{1, 3}.$$

Дифференцируя эти равенства по t с учетом (11) и (14), получим:

$$\begin{cases} x_1^2 = \dot{x}_1^1 = \frac{\partial x_1^1}{\partial s_1} \frac{\partial s_1}{\partial \gamma} \dot{\gamma}(s_1, s_2, s_3, t_1, t_2, t_3) = \\ = [t_1 \cos(s_3) + t_2 \sin(s_3)] / \cos(s_2); \\ x_2^2 = \dot{x}_2^1 = \frac{\partial x_2^1}{\partial s_2} \frac{\partial s_2}{\partial \psi} \dot{\psi}(s_1, s_2, s_3, t_1, t_2, t_3) = \\ = -t_1 \sin(s_3) + t_2 \cos(s_3); \\ x_3^2 = \dot{x}_3^1 = \frac{\partial x_3^1}{\partial s_3} \frac{\partial s_3}{\partial \theta} \dot{\theta}(s_1, s_2, s_3, t_1, t_2, t_3) = \\ = t_3 + tg(s_2)[t_2 \sin(s_3) + t_1 \cos(s_3)]. \end{cases} \quad (15)$$

Из (15) следует, что матрица Якоби J_2 преобразования

$$x^1 = x^1(s_1, s_2, s_3, t_1, t_2, t_3);$$

$$x^2 = x^2(s_1, s_2, s_3, t_1, t_2, t_3).$$

будет иметь вид:

$$J_2 = \frac{D(x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_1^2, x_2^2, x_3^2)}{D(s_1, s_2, s_3, t_1, t_2, t_3)} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Ss_2}{Cs_2^2} [t_1 Cs_3 + t_2 Ss_3] & \frac{1}{Cs_2^2} [-t_1 Ss_3 + t_2 Cs_3] & \frac{Cs_3}{Cs_2} & \frac{Ss_3}{Cs_2} & 0 \\ 0 & 0 & -t_1 Cs_3 - t_2 Ss_3 & -Ss_3 & Cs_3 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Cs_2^2} [t_1 Cs_3 + t_2 Ss_3] & tg(s_2) [t_2 Cs_3 + t_1 Ss_3] & Cs_3 tg(s_2) & Ss_3 tg(s_2) & 1 \end{bmatrix},$$

где $Ss_i = \sin(s_i)$; $Cs_i = \cos(s_i)$, $i = \overline{1,3}$.

Эта матрица удовлетворяет условию пропорций в области

$$H = \begin{bmatrix} \cos(\theta) / \cos(\psi) & -\sin(\theta) / \cos(\psi) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\psi) & 0 \\ -tg(\psi) \cos(\theta) & tg(\psi) \sin(\theta) & 1 \end{bmatrix}.$$

$$U = \{s_i, t_i : s_2, s_3 \in (-\pi/2, \pi/2), \forall s_i, \forall t_i, i = \overline{1,3}\},$$

так как ее последовательные главные миноры равны соответственно:

$$\Delta_1 = -1; \Delta_2 = 1; \Delta_3 = -1; \Delta_4 = -Cs_3 / Cs_2;$$

$$\Delta_5 = -1 / Cs_2; \Delta_6 = -1 / Cs_2.$$

Полученный результат вполне согласуется с утверждением, что глобальное взаимно однозначное преобразование (12) определено на U . Выражая x^1 и x^2 через φ и ω , получим:

$$\begin{cases} x_1^1 = \gamma; \\ x_2^1 = \psi; \\ x_3^1 = \theta; \end{cases} \begin{cases} x_1^2 = \dot{\gamma} = [\omega_1 \cos(\theta) - \omega_2 \sin(\theta)] / \cos(\psi); \\ x_2^2 = \dot{\psi} = \omega_1 \sin(\theta) + \omega_2 \cos(\theta); \\ x_3^2 = \dot{\theta} = \omega_3 + tg(\psi) [\omega_2 \sin(\theta) - \omega_1 \cos(\theta)]; \end{cases} \quad (16)$$

Соответствующие соотношения для

$$v_i(\varphi, \omega, u), i = \overline{1,3}$$

могут быть найдены с учетом (5) и (6):

$$v_i = \left\langle \frac{\partial x_i^2}{\partial \alpha}, f(\alpha) \right\rangle + \sum_{j=1}^3 u_j \left\langle \frac{\partial x_i^2}{\partial \alpha}, g^j \right\rangle, i = \overline{1,3}.$$

Перепишем это выражение в векторно-матричном виде:

$$v = h(\alpha) + H(\alpha)u, \quad (17)$$

$$\text{где } h(\alpha) = \begin{bmatrix} \left\langle \frac{\partial x_1^2}{\partial \alpha}, f(\alpha) \right\rangle \\ \left\langle \frac{\partial x_2^2}{\partial \alpha}, f(\alpha) \right\rangle \\ \left\langle \frac{\partial x_3^2}{\partial \alpha}, f(\alpha) \right\rangle \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix};$$

Вычисляя детерминант матрицы H , находим: $\det H = 1 / \cos(\psi)$. Очевидно, что $\det H \neq 0$ в области U и, следовательно, уравнения (17) могут быть разрешены относительно u_i , $i = \overline{1,3}$.

Таким образом, задачу построения взаимно однозначного преобразования системы (10) в систему (11) с областью определения U можно считать решенной. Необходимо отметить, что преобразование (16)–(17) означает переход от исходных координат (φ, ω) к нормальным координатам $(\varphi, \dot{\varphi})$ с одновременным изменением управляющих функций в соответствии с (17). В принципе, такой переход в рассмотренном случае может показаться достаточно очевидным. Однако предложенный подход применим и в существенно более сложных случаях, например когда вектор-функции g_j в (13) явно зависят от фазовых координат объекта. Кроме того, при его использовании имеется возможность нахождения области определения глобальных взаимно однозначных линеаризующих преобразований, что является определяющим при решении задач синтеза управления объектами рассматриваемого класса.

Обобщая полученные результаты, не составляет труда применить методику точной линеаризации и к общей динамической модели пространственного углового движения твердого тела с недиагональным тензором инерции и кинематическим соотношением, записанным с использованием углов Эйлера — Крылова для произвольной последовательности поворотов при совмещении координатных базисов.

Действительно, кинематические соотношения для произвольной последовательности углов Эйлера — Крылова $\varphi_i \rightarrow \varphi_j \rightarrow \varphi_k$, $i, j, k = \overline{1,3}$, $i \neq j \neq k$ можно представить в виде:

$$\dot{\varphi} = \Psi(\varphi)\omega, \quad (18)$$

где $\varphi = \text{col}(\varphi_i, \varphi_j, \varphi_k)$ — матрица-столбец углов Эйлера — Крылова;

$\omega = \text{col}(\omega_i, \omega_j, \omega_k)$, $i, j, k = \overline{1,3}$, $i \neq j \neq k$ — вектор угловой скорости объекта в проекциях на оси связанной системы координат (ССК);

$$\Psi(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_k)/\cos(\varphi_j) & -\xi \sin(\varphi_k)/\cos(\varphi_j) & 0 \\ \xi \sin(\varphi_k) & \cos(\varphi_k) & 0 \\ -\xi \text{tg}(\varphi_j) \cos(\varphi_k) & \text{tg}(\varphi_j) \sin(\varphi_k) & 1 \end{bmatrix}; \quad \xi = \begin{cases} 1, & ijk \in \{123, 231, 312\}; \\ -1, & ijk \in \{132, 213, 321\}. \end{cases}$$

Здесь предполагается, что $\varphi_1 = \gamma$, $\varphi_2 = \psi$, $\varphi_3 = \theta$. Соответствующим образом можно представить и динамические уравнения Эйлера:

$$\dot{\omega} = J^{-1}\Omega(\omega)J\omega + J^{-1}M, \quad (19)$$

где $M = \{M_i, i = \overline{1,3}\}$ — главный момент сил, действующих на объект, в проекциях на оси ССК;

J — тензор инерции твердого тела,

$$J = \begin{bmatrix} J_{ii} & J_{ij} & J_{ik} \\ J_{ij} & J_{jj} & J_{jk} \\ J_{ki} & J_{kj} & J_{kk} \end{bmatrix}; \quad \Omega(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & \xi\omega_k & -\xi\omega_j \\ -\xi\omega_k & 0 & \xi\omega_i \\ \xi\omega_j & -\xi\omega_i & 0 \end{bmatrix}; \quad i, j, k = \overline{1,3}, i \neq j \neq k.$$

Преобразование, переводящее систему (18)–(19) в линейную систему, имеет вид:

$$\dot{x}^1 = x^2; \quad \dot{x}^2 = v, \quad (20)$$

где $x^1 = \text{col}(x_i^1, i = \overline{1,3})$, $x^2 = \text{col}(x_i^2, i = \overline{1,3})$ — векторы фазовых координат и фазовых скоростей в пространстве преобразованных переменных; $v = \text{col}(v_i, i = \overline{1,3})$ — соответствующий вектор управления.

Данное преобразование должно удовлетворять условию:

$$\frac{\partial x^1(\varphi, \omega)}{\partial \omega} = 0 \quad \text{или} \quad x^1 = x^1(\varphi).$$

Задавая $x^1 = \varphi = \text{col}(x_1^1 = \varphi_i, x_2^1 = \varphi_j, x_3^1 = \varphi_k)$, $i, j, k = \overline{1,3}$, $i \neq j \neq k$ и дифференцируя эти соотношения по времени, будем иметь:

$$x^2 = \dot{x}^1 = \left[\frac{\partial x^1(\varphi)}{\partial \varphi} \right] \dot{\varphi} = \dot{\varphi} = \Psi(\varphi)\omega. \quad (21)$$

Соответствующие выражения для управлений можно записать в виде:

$$v = \dot{x}^2 = \left[\frac{\partial}{\partial \varphi} (\Psi(\varphi)\omega) \right] \dot{\varphi} + \left[\frac{\partial}{\partial \omega} (\Psi(\varphi)\omega) \right] \dot{\omega} = F(\varphi, \omega)\dot{\varphi} + \Psi(\varphi)\dot{\omega} = F(\varphi, \omega)\Psi(\varphi)\omega + \Psi(\varphi)J^{-1}[\Omega(\omega)J\omega + M], \quad (22)$$

$$\text{где } F(\varphi, \omega) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sin(\varphi_j)[\omega_i \cos(\varphi_k) - \xi\omega_j \sin(\varphi_k)]}{\cos^2(\varphi_j)} & \frac{-\omega_i \sin(\varphi_k) - \xi\omega_j \cos(\varphi_k)}{\cos(\varphi_j)} \\ 0 & 0 & -\omega_j \sin(\varphi_k) + \xi\omega_i \cos(\varphi_k) \\ 0 & \frac{\omega_j \sin(\varphi_k) - \xi\omega_i \cos(\varphi_k)}{\cos^2(\varphi_j)} & \text{tg}(\varphi_j)[\omega_j \cos(\varphi_k) + \xi\omega_i \sin(\varphi_k)] \end{bmatrix}.$$

Соотношение (22) может быть разрешено относительно M при условии, что $\varphi_j \in (-\pi/2, \pi/2)$:

$$M = J\Psi^{-1}(\varphi)[v - F(\varphi, \omega)\Psi(\varphi)\omega] - \Omega(\omega)J\omega. \quad (23)$$

Таким образом, соотношения (22) и (23) полностью определяют искомое преобразование. Однако для решения задач синтеза управления угловым движением твердого тела с учетом ограниченности мощности системы исполнительных органов преобразование в полученной форме к использованию непригодно.

Действительно, пусть на вектор управляющих моментов M в системе (18)–(19) наложено ограничение вида $M \in U_M$, где U_M — замкнутая область в пространстве управлений. Тогда из (23) следует, что

$$M = J\Psi^{-1}(\varphi)[v - F(\varphi, \omega)\Psi(\varphi)\omega] - \Omega(\omega)J\omega \in U_M. \quad (24)$$

Задача оптимальной переориентации твердого тела формулируется в следующем виде. Требуется перевести систему (13) из начального состояния $x^1(0) = x_0^1$, $x^2(0) = x_0^2$ в конечное $x^1(T) = x_T^1$, $x^2(T) = x_T^2$ с учетом ограничений на управления вида (24) и при этом оптимизировать некоторый показатель качества.

Данная задача не может быть решена традиционными методами, поскольку ограничения на v сложным образом зависят от фазовых координат. В связи с этим возникает необходимость дальнейшей модификации линеаризующих преобразований (21), (22) с тем, чтобы они были пригодны для использования при синтезе управления угловыми маневрами твердого тела. Наиболее очевидной представляется попытка упростить каким-либо образом ограничения (24). С этой целью предлагается построить приближенное обратное преобразование системы (20) к линейной псевдокоординатной форме. При этом вид системы (20) не изменяется (в первом приближении), а ограничения на управляющие параметры в новой системе значительно упрощаются (приводятся к исходным). Однако новые координаты, строго говоря, не являются координатами в общепринятом смысле, поскольку они описывают реальное движение объекта с некоторой степенью приближения. В связи

с этим рассматриваемое отображение и названо псевдокоординатным.

Методика псевдокоординатной линеаризации уравнений углового движения многосвязного динамического объекта с присоединенными упругими элементами конструкции

Математическая модель процесса управляемого углового движения объекта, представляющего собой твердое тело (корпус) с присоединенными к нему упругими элементами конструкции (УЭК), может быть представлена в виде [1, 5]:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \Psi(\varphi)\omega; \\ \dot{\omega} = I^{-1}\Omega(\omega)J\omega + I^{-1}M^*, \end{cases} \quad (25)$$

где $M^* = M + \sum_{s=1}^N A_s(D_s \dot{q}_s + \Omega_s q_s)$.

Структурная эквивалентность математических моделей (25) и (18)–(19) позволяет воспользоваться разработанной методикой псевдокоординатной линеаризации.

Согласно этой методике, на первом этапе вводятся новые координаты (21) и система (25) точно преобразуется в промежуточную систему вида:

$$\dot{x}^1 = x^2; \quad \dot{x}^2 = v^*, \quad (26)$$

где $v^* = F(\varphi, \omega)\Psi(\varphi)\omega + \Psi(\varphi)I^{-1}[\Omega(\omega)J\omega + M^*]$;

$$F(\cdot) = \frac{\partial[\Psi(\varphi)\omega]}{\partial\varphi}.$$

Как и в случае твердого тела, вектор-функция управлений v^* преобразованной системы (26) нелинейно зависит от параметров, характеризующих текущее положение объекта управления. Данное обстоятельство не позволяет непосредственно перейти к синтезу законов управления из-за сложного вида ограничений, накладываемых на управляющие функции. Поэтому на втором этапе строится приближенное обратное преобразование $(x^1, x^2) \rightarrow (y^1, y^2)$. При этом ограничения на управление преобразуются к исходному виду с сохранением простоты структуры уравнений, описывающих динамику объекта во вновь преобразованном координатном базисе (y^1, y^2) :

$$\dot{y}^1 = y^2; \quad \dot{y}^2 = w^*,$$

где $w^* = M^*$;

$$y^j(0) = y_0^j;$$

$$y^j(T) = 0, \quad j = 1, 2;$$

$$\vartheta = \hat{\Phi}^{-1}(\varphi)\varphi;$$

$$y^1 = I\hat{\Psi}^{-1}(\varphi)(\varphi - \varphi_T) - 0,5\Omega(\vartheta)J\vartheta + \sigma I\omega_T;$$

$$y^2 = I(\omega - \omega_T) + \frac{1}{\sigma}\Omega(\vartheta)J\vartheta.$$

Система уравнений в псевдокоординатах, описывающая управляемую угловую динамику объекта с присоединенными УЭК, будет иметь вид:

$$\begin{cases} \dot{y}^1 = y^2; \\ \dot{y}^2 = \sum_{s=1}^N A_s(D_s \dot{q}_s + \Omega_s q_s) + w; \\ \ddot{q} = -D_s^* \dot{q}_s - \Omega_s^* q_s - w_s; \end{cases}$$

где $w_s = K_s[\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq s}}^N A_j(D_j \dot{q}_j + \Omega_j q_j) + \Omega(\omega)J\omega + w]$, $w = M$.

Кроме того, пренебрегая взаимовлиянием УЭК через корпус объекта, можно записать:

$$w_s = K_s[\Omega(\omega)J\omega + w]. \quad (27)$$

Анализируя соотношения (25) и (27), можно убедиться, что динамика упругой системы не зависит от проведенного преобразования координатных базисов. Уравнения колебаний в исходной системе (25) были линейными, линейными они остались и в ре-

зультатирующей системе (27). Это существенное преимущество применяемого метода линеаризующих отображений. Кроме того, весьма удобно совпадение векторов управляющих моментов (M и w) исходной (25) и результирующей (27) систем.

Система (27) удобна для решения задач синтеза управлений угловым движением объектов со сложными динамическими схемами, поскольку каналы управления системы могут рассматриваться независимо. Более того, полученная динамическая система хорошо согласуется с принципом квазизатвердевания упругого элемента (УЭ) в процессе функционирования системы управления угловым движением объекта, реализация которого позволяет осуществить динамическую развязку движений корпуса объекта и присоединенных УЭ.

Заключение

Таким образом, в статье получена конечномерная математическая модель, применимая для решения задач синтеза оптимального, робастного и финитного управления пространственным угловым движением телеуправляемого летательного аппарата на основе применения метода псевдокоординатной линеаризации. Применение полученной модели позволяет осуществить динамическую развязку движений корпуса объекта и присоединенных УЭ, что, в свою очередь, позволяет повысить качество решения целевых задач летательным аппаратом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев К. Б., Бебенин Г. Г. Управление космическими летательными аппаратами. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974. 340 с.
2. Атанс М., Фалб П. Л. Оптимальное управление = Optimal Control: An Introduction to the Theory and Its Applications / пер. с англ. Г. Н. Алексакова; под ред. Ю. И. Топчиева. М.: Машиностроение, 1968. 764 с.
3. Городецкий В. И. Прикладная алгебра и дискретная математика: в 3 ч. Ч. 1. Алгебраические системы. Л.: МО СССР, 1984. 174 с.
4. Дегтярев Г. Л., Сиразетдинов Т. К. Теоретические основы оптимального управления упругими космическими аппаратами. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
5. Докучаев Л. В. Нелинейная динамика летательных аппаратов с деформируемыми элементами. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.
6. Кейн Т. Р., Левинсон Д. А. Вывод уравнений движения для сложных космических аппаратов // Ракетная техника и космонавтика = AIAA Journal: журнал Американского института аэронавтики и космонавтики. 1980. Т. 18, № 9–10. С. 158–173.

Дата поступления: 01.08.2025

Решение о публикации: 21.08.2025

Linearization of the Motion Model of a Multi-Connected Dynamic Object by Pseudo-Coordinate Linearization

Yuri S. Manuilov — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Independent Researcher. Research interests: management of complex organizational and technical facilities, optimization of complex operations. E-mail: manuilov.yuriy@yandex.ru

Andrey V. Tolokonnikov¹ — PhD in Engineering, Lecturer of the Space Radioelectronic Control Department. Research interests: management of complex organizational and technical facilities, operation of technical systems. E-mail: andrew-tolokonnikov@rambler.ru

¹Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, Russia, 197198

For citation: Manuilov Yu. S., Tolokonnikov A. V. Linearization of the Motion Model of a Multi-Connected Dynamic Object by Pseudo-Coordinate Linearization. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 3 (43), Pp. 58–67. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-58-67. (In Russian)

Abstract. *A method is proposed for linearizing a non-linear model of the controlled motion of a multi-connected dynamic object with attached structural elastic elements. The method is founded on the use of non-special transformations of smooth manifolds based on the well-known Lie algebra. **Purpose:** to apply a well-developed theory of optimal linear control based on L. S. Pontryagin's maximum principle or R. Bellman's principle of optimality. **Methods:** the general theoretical approach of pseudo-coordinate linearization is considered, and the procedure for linearizing the model of controlled angular motion of a remote-controlled aircraft is illustrated. **Practical significance:** a finite-dimensional mathematical model has been obtained that is applicable to solving the synthesis problems of optimal, robust and finite control of spatial angular motion of a remote-controlled aircraft.*

Keywords: *non-linear differential equations, pseudo-coordinate linearization, optimal, robust and finite control*

REFERENCES

1. Alekseev K. B., Bebenin G. G. Upravlenie kosmicheskimi letatelnyimi apparatami [Control of spacecraft]. Moscow, Mashinostroenie Publishing House, 1974, 340 p. (In Russian)
2. Athans M., Falb P. L. Optimalnoe upravlenie [Optimal Control]. Moscow, Mashinostroenie Publishing House, 1968, 764 p. (In Russian)
3. Gorodetsky V. I. Prikladnaya algebra i diskretnaya matematika. Chast 1. Algebraicheskie sistemy [Applied Algebra and Discrete Mathematics: in 3 parts. Part 1. Algebraic Systems]. Leningrad [Saint Petersburg], Ministry of Defense of the USSR, 1984, 174 p. (In Russian)
4. Degtyarev G. L., Sirazetdinov T. K. Teoreticheskie osnovy optimalnogo upravleniya uprugimi kosmicheskimi apparatami [Theoretical Foundations of Optimal Control of Elastic Spacecraft]. Moscow, Mashinostroenie Publishing House, 1986, 216 p. (In Russian)
5. Dokuchaev L. V. Nelineynaya dinamika letatelnykh apparatov s deformiruemymi elementami [Nonlinear Dynamics of Aircraft with Deformable Elements]. Moscow, Mashinostroenie Publishing House, 1987, 232 p. (In Russian)
6. Kane T. R., Levinson D. A. Vyvod uravneniy dvizheniya dlya slozhnykh kosmicheskikh apparatov [Formulation of Equations of Motion for Complex Spacecraft], *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika [AIAA Journal]*, 1980, Vol. 18, No. 9–10, Pp. 158–173. (In Russian)

Received: 01.08.2025

Accepted: 21.08.2025

УДК 656:004.9:378

Анализ математических подходов к моделированию ОПОП для кадрового обеспечения цифровой трансформации транспорта

Сергеева Дарья Владимировна — ассистент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. E-mail: dsergeeva@pgups.ru

Баталов Дмитрий Иннокентьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, программные роботы, нейронные сети. E-mail: d.i.batalov@yandex.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сергеева Д. В., Баталов Д. И. Анализ математических подходов к моделированию ОПОП для кадрового обеспечения цифровой трансформации транспорта // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 68–76. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-68-76

Аннотация. *Цель:* выявление методологических ограничений существующих подходов к проектированию основных профессиональных образовательных программ (ОПОП) и разработка концептуальной основы нового математического подхода, ориентированного на решение задачи кадрового обеспечения цифровой трансформации транспортной отрасли. *Методы:* для классификации существующих подходов к моделированию ОПОП применяются методы системного и сравнительного анализа. В качестве концептуального инструментария для предлагаемого решения используются теория графов и методы интеллектуального анализа данных. *Результаты:* проведена классификация подходов к проектированию ОПОП, выявлена их недостаточная адаптивность к динамичным требованиям высокотехнологичных отраслей. Предложена концептуальная математическая модель ОПОП, системно интегрирующая внутреннюю структуру программы (дисциплины, пререквизиты) с внешними требованиями, извлекаемыми из профессиональных стандартов и актуальных данных рынка труда транспортной отрасли. Модель основана на представлении ОПОП в виде взвешенного ориентированного графа и введении интегрального показателя качества. *Практическая значимость:* заключается в создании научно-методологической основы для перехода от интуитивных, экспертных практик к доказательному, основанному на данных проектированию ОПОП. Внедрение предложенного подхода в перспективе позволит повысить релевантность образовательных программ, сократить сроки их адаптации и снизить дефицит кадров для таких направлений, как беспилотные транспортные системы, интеллектуальное управление перевозками и цифровая логистика.

Ключевые слова: математическое моделирование, образовательная программа, теория графов, интеллектуальный анализ данных, цифровая трансформация транспорта, кадровое обеспечение, система поддержки принятия решений

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); **1.2.1** — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

Введение

Цифровая трансформация транспортной отрасли, выраженная в активном развитии беспилотных систем, интеллектуальных транспортных сетей, цифровой логистики и систем управления движением, формирует беспрецедентный по своей сложности и динамике спрос на специалистов с новыми междисциплинарными компетенциями. Однако традиционная система высшего образования, характеризующаяся значительной инерционностью, не всегда способна оперативно реагировать на эти вызовы. Это приводит к возникновению кадрового дефицита, тормозящего внедрение и развитие технологий нового уклада.

В международном научном дискурсе данная проблема определяется как «грубое несоответствие» (gross mismatch) между содержанием образования и реальными потребностями экономики [1]. Существующие подходы к проектированию основных профессиональных образовательных программ (ОПОП), основанные преимущественно на экспертных оценках и работе учебно-методических комиссий, страдают субъективизмом, высокой трудоемкостью и неспособны эффективно обрабатывать большие, постоянно обновляемые объемы данных о требованиях рынка труда. Необходимость анализа тысяч текстовых описаний вакансий, содержания новых профессиональных стандартов и отраслевых отчетов существенно превышает возможности традиционных ручных, интуитивных методов обработки данных.

Несостоятельность таких подходов наглядно демонстрируется эмпирическими исследованиями. В [2] при формальном анализе действующего учебного плана были обнаружены серьезные логические ошибки в экспертном проектировании: дисциплина «*Модели архитектуры клиент-сервер*» (2 семестр), являющаяся преемственной, изучается до освоения базовой дисциплины «*Архитектура информационных систем*» (6 семестр). Подобные структурные дефекты, приводящие к нарушению каузальных связей в образовательном процессе, свидетельствуют о наличии фундаментального научного противоречия между объективной потреб-

ностью в научно обоснованном, доказательном проектировании ОПОП и отсутствием адекватных для этого формализованных методов и инструментальных средств.

В связи с этим целью статьи выступает системный анализ существующих математических подходов к моделированию ОПОП, а также разработка на основе выявленных ограничений концепции комплексной математической модели для решения задачи кадрового обеспечения цифровой трансформации транспортной отрасли.

Анализ современных подходов к проектированию ОПОП

Анализ современной научной литературы и сложившейся практики позволяет классифицировать существующие подходы к проектированию и аудиту ОПОП на несколько групп, каждая из которых обладает своими преимуществами, но и несет в себе существенные ограничения, особенно в контексте кадрового обеспечения таких динамичных отраслей, как транспортная.

Экспертно-ориентированные подходы

Данная группа является наиболее традиционной и широко распространенной в практике вузов. Проектирование осуществляется на основе коллективных решений учебно-методических комиссий, заключений руководителей образовательных программ и ведущих преподавателей. Как отмечается в [3], формирование системы ограничений для построения учебного плана в таких подходах основано на «*экспертных знаниях преподавателей*». Ключевыми недостатками данного подхода являются субъективизм, зависимость от квалификации и личных предпочтений конкретных экспертов, высокая трудоемкость ручного анализа документов и, как следствие, низкая скорость адаптации программ к динамичным запросам внешней среды. Сложность взаимосвязей между многочисленными компонентами ОПОП, которую необходимо учитывать экспертам, часто приводит к ошибкам и логическим противоречиям.

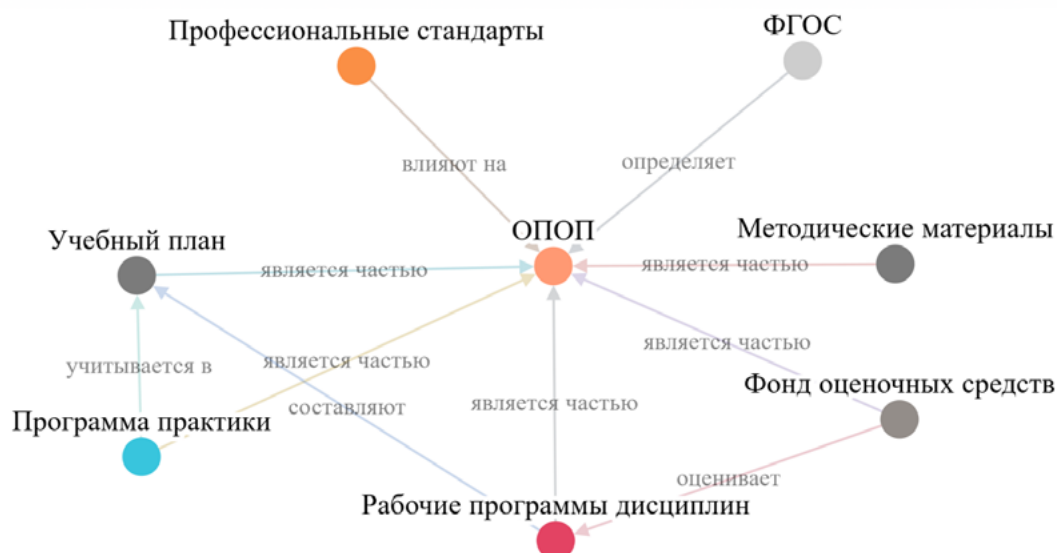


Рис. 1. Графовая модель ОПОП

Схема (рис. 1) иллюстрирует сложность взаимосвязей, с которой не справляются ручные, интуитивные методы, что и приводит к ошибкам, подобным описанным в [2].

Подходы на основе формальных моделей

В ряде исследований предпринимаются попытки преодолеть ограничения экспертных методов путем применения математического аппарата. Наиболее распространенным инструментом является теория графов, которая используется для моделирования междисциплинарных связей и структуры учебного плана [4–6]. Для более строгого описания предметной области применяются и более абстрактные онтологические подходы [7]. Несмотря на очевидные преимущества в части строгости и объективности описания, данные подходы имеют фундаментальное ограничение: они сфокусированы преимущественно на моделировании *внутренней* структуры ОПОП и слабо связаны с анализом внешних требований.

Подходы, использующие анализ данных

Это направление исследований, напротив, сфокусировано на применении методов интеллектуального анализа данных для извлечения знаний из внешних источников. Ключевой задачей здесь является объективизация требований к выпускникам на основе анализа реальных данных, в первую

очередь с рынка труда. Например, в [8] для анализа текстов вакансий и формирования на их основе модели востребованного ИТ-специалиста применяется денотативная аналитика. Однако ограничение таких подходов является зеркальным по отношению к предыдущей группе: они эффективно отвечают на вопрос «ЧЕМУ учить?», но не предлагают инструментария для системной интеграции этих требований в логически непротиворечивую структуру учебного плана.

Выявление методологического разрыва

Проведенный анализ показывает, что существующие подходы носят фрагментарный характер. Как указывается в [9], в контексте смежной задачи отмечается многообразие существующих подходов, однако отсутствует целостное интегрированное решение проблемы. Сложилась ситуация, при которой существует фундаментальное противоречие: с одной стороны, разработаны формальные модели, позволяющие строго описать внутреннюю структуру программы, но оторванные от динамики внешней среды, с другой стороны, существуют методы интеллектуального анализа, позволяющие извлекать актуальные требования из внешней среды, но не предлагающие инструментов для их системной трансляции в конкретную структуру ОПОП. Преодоление этого методологического разрыва и является ключевой задачей.

Сравнительный анализ подходов к моделированию и проектированию ОПОП

Подход	Сущность метода	Преимущества	Ограничения и недостатки
Экспертно-ориентированный	Проектирование на основе коллективных решений учебно-методических комиссий и ведущих преподавателей	Учет педагогического опыта и традиций вуза	Субъективизм, высокая трудоемкость, низкая скорость адаптации, риск логических ошибок
На основе формальных моделей	Применение математического аппарата (теория графов, онтологии) для описания внутренней структуры ОПОП и междисциплинарных связей	Строгость, объективность описания, возможность автоматизированного анализа структуры	Фокус на внутренней структуре, слабая связь с динамичными внешними требованиями (рынком труда)
Использующий анализ данных	Применение методов интеллектуального анализа данных (NLP, Data Mining) для извлечения требований из внешних источников (вакансий, стандартов)	Объективизация требований к выпускникам на основе реальных данных, высокая адаптивность к запросам рынка	Отсутствие инструментария для системной интеграции извлеченных требований в логическую структуру учебного плана
Предлагаемый комплексный подход	Системная интеграция графовой модели структуры ОПОП с результатами интеллектуального анализа внешних данных	Системность, объективность, измеримость, адаптивность	Требует разработки специализированных численных методов и программных комплексов

Проведенный анализ современной научной литературы и сложившейся практики позволяет классифицировать существующие подходы к проектированию и аудиту ОПОП на несколько ключевых групп. Для систематизации результатов проведенного анализа и наглядного сравнения концептуальных рамок, преимуществ и методологических ограничений рассмотренных подходов представим их основные характеристики в форме сравнительной таблицы (табл. 1).

Данная классификация позволяет не только структурировать существующее поле исследований, но и наглядно продемонстрировать их определенную фрагментарность, а также выявить тот методологический разрыв, на преодоление которого направлен предлагаемый в настоящей работе комплексный подход.

Концепция комплексного моделирования ОПОП для транспортной отрасли

Предлагаемый подход к решению задачи адаптивного проектирования ОПОП базируется на системной интеграции трех ключевых компонентов:

- формализация предметной области;
- построение графовой модели структуры ОПОП;
- разработка математической модели для количественной оценки.

Формализация предметной области

Первым и необходимым шагом является декомпозиция предметной области на ключевые сущности, что является общепринятым подходом в системной инженерии [10]. В рамках предлагаемой концепции вводятся следующие формальные множества:

- $D = \{d_i\}$ — конечное множество **дисциплин** (модулей), составляющих учебный план ОПОП. Данное множество представляет собой «строительные блоки» программы, ее внутреннее содержание, структурная декомпозиция которого для наглядности представлена на рис. 2.

- $C = \{c_j\}$ — конечное множество **компетенций**, определенных ФГОС и профессиональными стандартами для транспортной отрасли. Примеры таких компетенций: «Разработка алгоритмов управления для беспилотных транспортных средств», «Моделирование интеллектуальных логистических сетей», «Анализ данных с бортовых сенсорных систем».

- $R = \{r_k\}$ — конечное множество **формализованных требований** (конкретных навыков, знаний, технологий), извлеченных из текстов актуальных вакансий и отраслевых стандартов. Примеры таких требований: «владение фреймворком ROS (Robot Operating System)», «знание протоколов V2X (vehicle-to-everything)».



Рис. 2. Компоненты учебного плана

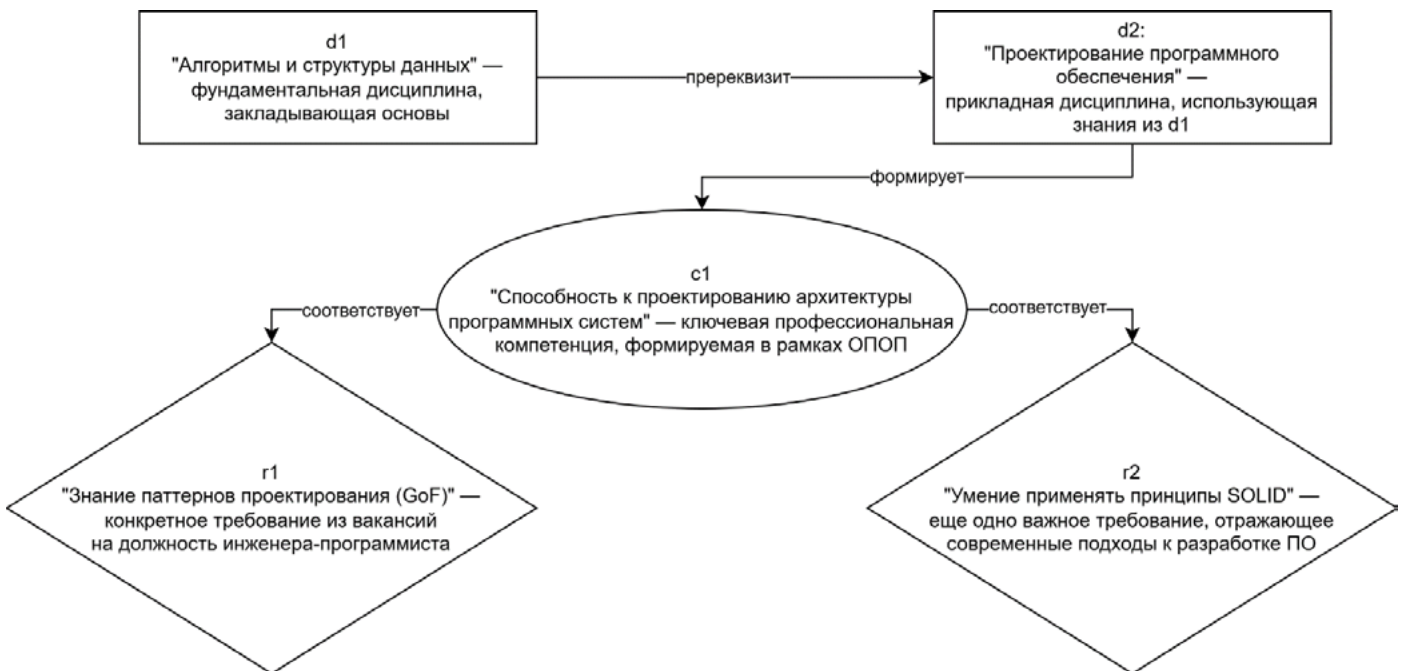


Рис. 3. Пример фрагмента графовой модели ОПОП для направления «Программное обеспечение средств вычислительной техники и автоматизированных систем»

Графовая модель структуры ОПОП

Для системного представления ОПОП и ее связей с внешней средой предлагается использовать **взвешенный ориентированный граф** $G = (V, E)$, где множество вершин является объединением ранее введенных множеств: $V = D \cup C \cup R$.

Выбор графовой модели обоснован тем, что, как отмечается в [11], «*орграфы широко применяются в программировании как способ описания систем со сложными связями*». Такая модель позволяет наглядно представить междисциплинарные свя-

зи, пререквизиты и связи дисциплин с компетенциями, что решает проблему «*фрагментарности традиционной линейной подачи информации*» [12] и создает строгую математическую основу для последующего анализа.

Для наглядной демонстрации возможностей и семантического наполнения предложенной графовой модели рассмотрим ее гипотетический фрагмент, построенный для ОПОП, ориентированной на подготовку специалистов в области беспилотных транспортных систем (рис. 3).

Фрагмент на рис. 3 иллюстрирует, каким образом модель системно интегрирует внутренние компоненты программы (фундаментальные и прикладные дисциплины, пререквизитные связи) с ее целевыми установками (профессиональными компетенциями) и конкретными требованиями транспортной отрасли, извлеченными из анализа рынка труда. На схеме представлены вершины, соответствующие различным типам сущностей (D , C , R), и направленные ребра, отражающие каузальные и семантические связи между ними.

Модель оценки соответствия

Для перехода от структурного описания к количественному анализу и поддержке принятия решений вводится **интегральный показатель качества ОПОП** $Q(P)$. Он определяется как взвешенная аддитивная свертка нормированных частных критериев:

$$Q(P) = \sum_{k=1}^N \alpha_k F_k(P).$$

Подобный подход к агрегации критериев успешно применяется в смежных задачах оценки: например, в [13] для оценки обученности используется формула вида $\theta = \sum \omega_j \theta_{ki}$. В рамках концепции предлагаются следующие ключевые частные критерии:

- $F_1(P)$ — **критерий полноты покрытия компетенций**. Оценивает, насколько совокупность дисциплин программы обеспечивает формирование всего перечня требуемых стандартами компетенций.
- $F_2(P)$ — **критерий соответствия ОПОП актуальным требованиям рынка труда**. Измеряет релевантность программы запросам транспортной отрасли на основе анализа связей с множеством R .
- $F_3(P)$ — **критерий внутренней структурной согласованности**. Оценивает логическую целостность и непротиворечивость самой программы на основе применения графовых метрик.

Заключение

Проведенный системный анализ существующих подходов к проектированию ОПОП выявил их фрагментарность и недостаточную адаптивность,

что формирует объективную потребность в новых научно обоснованных инструментах, способных обеспечить адекватный ответ системы высшего образования на вызовы цифровой трансформации транспорта.

Предложенная концепция комплексного математического моделирования обладает рядом принципиальных преимуществ. Во-первых, это **системность**, достигаемая за счет интеграции в единой графовой модели внутренних (дисциплины, пререквизиты) и внешних (стандарты, рынок труда) факторов. Во-вторых, это **объективность**, основанная на перспективе применения методов интеллектуального анализа данных для извлечения требований из реальных источников, а не только на мнениях экспертов. В-третьих, это **измеримость**, обеспечиваемая введением формального интегрального показателя качества, который позволяет количественно оценивать и сравнивать различные варианты структуры ОПОП.

Практическая значимость предложенной концепции заключается в создании научно-методологической базы для перехода от интуитивных практик к доказательному проектированию образовательных программ, основанному на объективных данных. Внедрение такого подхода позволит транспортным университетам оперативно адаптировать содержание ОПОП к запросам индустрии, формируя у выпускников компетенции, востребованные в таких передовых областях, как беспилотные транспортные системы и цифровая логистика. Для кадровых служб транспортных компаний данный подход открывает возможность транслировать свои требования к подготовке специалистов в формализованном виде, напрямую влияя на образовательный процесс.

Дальнейшее развитие данного исследования предполагает переход от концептуальной основы к ее практической реализации: разработке численных методов и алгоритмов интеллектуального анализа данных для автоматизированного построения и анализа предложенной модели, а также их реализации в виде проблемно-ориентированного комплекса программ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. The Future of Higher Education: Identifying Current Educational Problems and Proposed Solutions / H. Halabieh, S. Hawkins, A. E. Bernstein [et al.] // Education Sciences. 2022. Vol. 12, Iss. 12. Art. No. 888. 19 p. DOI: 10.3390/educsci12120888.
2. Воробьева Н. А., Носков С. И. Расчет основных параметров учебного плана с учетом междисциплинарных связей // Фундаментальные исследования. 2012. № 9. С. 894–898.
3. Юрчишина М. В., Бушмелева К. И. Экспертная оценка групп связанных дисциплин учебного плана для бакалавриата по направлению «Информатика и вычислительная техника» // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии (ИНФО–2023): сборник трудов XX Международной научно-практической конференции (Махачкала, Россия, 01–10 октября 2023 г.). М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2023. С. 174–178.
4. Ботов Д. С. Интеллектуальная поддержка формирования образовательных программ на основе нейросетевых моделей языка с учетом требований рынка труда // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19, № 1. С. 5–19. DOI: 10.14529/ctcr190101.
5. Применение силового алгоритма визуализации графов для анализа учебных планов образовательных программ высшего образования / Т. В. Зыкова, А. А. Кытманов, М. В. Носков, Е. А. Халтурин // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 1. С. 104–116. DOI: 10.25559/SITITO.019.202301.104-116.
6. Лобашев В. Д. Функции, алгоритмы и аргументы модели процесса оценивания // Интеграция образования. 2015. Т. 19, № 1. С. 82–92. DOI: 10.15507/Inted.078.019.201501.082.
7. Метод формального онтологического моделирования и реализации функций системной инженерии на основе принципа достаточного разнообразия структурных связей / В. В. Антонов, А. П. Бельтюков, Г. Г. Куликов, Л. Е. Родионова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19, № 4. С. 13–26. DOI: 10.14529/ctcr190402.
8. Яруллин Д. В. Интеллектуальная система управления подготовкой ИТ-специалистов на основе денотативной аналитики // Прикладная математика и вопросы управления. 2022. № 3. С. 141–164. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.3.08.
9. Спиридонов Р. С. Архитектура приложения для поддержки различных типов алгоритмических задач и их автоматизированной проверки в системах электронного обучения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 3 (176). С. 87–96.
10. Колыбенко Е. Н. Разграничение понятий «структурно-функционально-параметрическая модель» и «параметрическая модель» информационных объектов знаний // Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 1. С. 106–111. DOI: 10.23947/1992-5980-2020-20-1-106-111.
11. Телегина М. В., Янников И. М. Программная оболочка для создания экспертных систем GrafExpert // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 6 (155). С. 67–73.
12. Штагер Е. В., Бережнова Е. И. Принципы конструирования дидактического обеспечения базовых вузовских дисциплин // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 8. С. 235–239. DOI: 10.17513/snt.38810.
13. Преображенский А. П., Маренков Н. М. Оценка степени обученности математике и информатике // CONTINUUM. Математика. Информатика. Образование. 2024. № 3 (35). С. 60–68. DOI: 10.24888/2500-1957-2024-3-60-68.

Дата поступления: 18.08.2025

Решение о публикации: 21.08.2025

Mathematical Approaches to Modelling Basic Professional Education Programmes for Personnel Support of Transport Digital Transformation

Daria V. Sergeeva

— Assistant of the Information and Computing Systems Department. Research interests: mathematical modelling, numerical methods and software suites. E-mail: dsergeeva@pgups.ru

Dmitry I. Batalov

— PhD in Engineering, Associate Professor of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, big data processing, software robots, neural networks. Email: d.i.batalov@yandex.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Sergeeva D. V., Batalov D. I. Mathematical Approaches to Modelling Basic Professional Education Programmes for Personnel Support of Transport Digital Transformation. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 3 (43), Pp. 68–76. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-68-76. (In Russian)

Abstract. Purpose: to identify methodological limitations of the existing approaches to designing Basic Professional Education Programmes (BPEP) and to develop a conceptual framework for a new mathematical approach aimed at addressing personnel needs for the digital transformation of the transport sector. **Methods:** systematic and comparative analysis of existing approaches to modelling Basic Professional Education Programmes. The proposed solution employs graph theory and data mining techniques as conceptual tools. **Results:** a BPEP classification of design approaches was carried out, revealing their insufficient adaptability to the dynamic demands of high-tech industries. A conceptual mathematical model of Basic Professional Education Programme was proposed, systematically integrating the programme internal structure (disciplines, prerequisites) with external requirements derived from professional standards and current labour market data in the transport sector. The model is based on representing BPEP as a weighted directed graph and introducing an integral quality metric. **Practical significance:** the study provides a scientific and methodological foundation for transitioning from intuitive, expert-based practices to a research-based, data-driven BPEP design. Implementing the proposed approach will enhance the relevance of educational programmes, reduce adaptation time, and address personnel shortages in areas such as autonomous transport systems, intelligent transport management, and digital logistics.

Keywords: mathematical modelling, degree programme, graph theory, data mining, transport digital transformation, personnel support, decision support system

REFERENCES

1. Halabieh H., Hawkins S., Bernstein A. E., et al. The Future of Higher Education: Identifying Current Educational Problems and Proposed Solutions, *Education Sciences*, 2022, Vol. 12, Iss. 12, Art. No. 888, 19 p. DOI: 10.3390/educsci12120888.
2. Vorobyeva N. A., Noskov S. I. Raschet osnovnykh parametrov uchebnogo plana s uchetom mezhdistsiplinarnykh svyazey [University Curriculum Parameters Calculation with Logical Dependences Between Courses], *Fundamentalnye issledovaniya [Fundamental Research]*, 2012, No. 9, Pp. 894–898. (In Russian)
3. Yurchishina M. V., Bushmeleva K. I. Ekspertnaya otsenka grupp svyazannykh distsiplin uchebnogo plana dlya bakalavriata po napravleniyu “Informatika i vychislitel'naya tekhnika” [Expert Assessment of Groups of Related Subjects of the Curriculum for the Bachelor Studies in the Direction “Computer science and engineering”], *Innovatsionnye*,

informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii (INFO–2023): sbornik trudov XX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative, Information and Communication Technologies (INFO-2023): Collection of Works of the XX International Scientific and Practical Conference], Makhachkala, Russia, October 01–10, 2023. Moscow, Association of Graduates and Employees of AFEA named after prof. N. E. Zhukovsky, 2023, Pp. 174–178. (In Russian)

4. Botov D. S. Intellekturnaya podderzhka formirovaniya obrazovatelnykh programm na osnove neyrosetevykh modely yazyka s uchetom trebovaniy rynka truda [Intelligent Support Development of Educational Programs Based on the Neural Language Models Taking into Account of the Labor Market Requirements], *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika” [Bulletin of the South Ural State University. Series “Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics”]*, 2019, Vol. 19, No. 1, Pp. 5–19. DOI: 10.14529/ctcr190101. (In Russian)

5. Zykhova T. V., Kytmanov A. A., Noskov M. V., Khalturin E. A. Primenenie silovogo algoritma vizualizatsii grafov dlya analiza uchebnykh planov obrazovatelnykh programm vysshego obrazovaniya [Application of a Force-Directed Graph Drawing Algorithm for the Analysis of Curricula of Educational Programs of Higher Education], *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie [Modern Information Technologies and IT-Education]*, 2023, Vol. 19, No. 1, Pp. 104–116. DOI: 10.25559/SITITO.019.202301.104-116. (In Russian)

6. Lobashev V. D. Funktsii, algoritmy i argumenty modeli protsessa otsenivaniya [Functions, Algorithms and Arguments of Evaluation Process Model], *Integratsiya obrazovaniya [Integration of Education]*, 2015, Vol. 19, No. 1, Pp. 82–92. DOI: 10.15507/Inted.078.019.201501.082. (In Russian)

7. Antonov V. V., Beltyukov A. P., Kulikov G. G., Rodionova L. E. Metod formalnogo ontologicheskogo modelirovaniya i realizatsii funktsiy sistemnoy inzhenerii na osnove printsipa dostatochnogo raznoobraziya strukturnykh svyazey [Formal Representation of the Model of Realization of the Functions of System Engineering Based on the Principle of the Enough Diversity of Structural Connections], *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika” [Bulletin of the South Ural State University. Series “Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics”]*, 2019, Vol. 19, No. 4, Pp. 13–26. DOI: 10.14529/ctcr190402. (In Russian)

8. Yarullin D. V. Intellekturnaya sistema upravleniya podgotovkoy IT-spetsialistov na osnove denotativnoy analitiki [Intelligent Control System for IT Specialists Training Based on Denotative Analytics], *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya [Applied Mathematics and Control Sciences]*, 2022, No. 3, Pp. 141–164. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.3.08. (In Russian)

9. Spiridonov R. S. Arkhitektura prilozheniya dlya podderzhki razlichnykh tipov algoritmicheskikh zadach i ikh avtomatizirovannoy proverki v sistemakh elektronnoho obucheniya [Application Architecture for Support of Multiple Question Types and Their Automated Grading in e-Learning Systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2016, No. 3 (176), Pp. 87–96. (In Russian)

10. Kolybenko E. N. Distinction Between Concepts of “Structural-Functional-Parametric Model” and “Parametric Model” of Information Knowledge Objects, *Vestnik of Don State Technical University*, 2020, Vol. 20, No. 1, Pp. 106–111. DOI: 10.23947/1992-5980-2020-20-1-106-111.

11. Telegina M. V., Yannikov I. M. Программная оболочка для создания экспертных систем GrafExpert [Modeling Environment for Creation of Expert Systems GrafExpert], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2014, No. 6 (155), Pp. 67–73. (In Russian)

12. Shtager E. V., Berezhnova E. I. Printsipy konstruirovaniya didakticheskogo obespecheniya bazovykh vuzovskikh distsiplin [Design’s Principles of Didactic Provision of Basic University Disciplines], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii [Modern High Technologies]*, 2021, No. 8, Pp. 235–239. DOI: 10.17513/snt.38810. (In Russian)

13. Preobrazhenski A. P., Marenkov N. M. Otsenka stepeni obuchennosti matematike i informatike [Assessment of the Degree of Learning in Mathematics and Computer Science], *CONTINUUM. Matematika. Informatika. Obrazovanie [CONTINUUM. Mathematics. Computer science. Education]*, 2024, No. 3 (35), Pp. 60–68. DOI: 10.24888/2500-1957-2024-3-60-68. (In Russian)

Received: 18.08.2025

Accepted: 21.08.2025

УДК 681.51

Позиционирование подвижного состава на основе алгоритмов нечеткой логики для определения аномалий движения

Фоменко Юлия Сергеевна¹ — магистр, аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, нечеткие интеллектуальные системы, системы искусственного интеллекта. E-mail: yu.srgvn@gmail.com

Хомоненко Анатолий Дмитриевич^{1, 2} — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы»; профессор кафедры «Математическое и программное обеспечение». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, вероятностное моделирование геоинформационных систем, генетические алгоритмы, информационная безопасность. E-mail: khomon@mail.ru

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Для цитирования: Фоменко Ю. С., Хомоненко А. Д. Позиционирование подвижного состава на основе алгоритмов нечеткой логики для определения аномалий движения // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 77–86. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-77-86

Аннотация. Актуальность задач своевременного определения аномалий движения транспортных объектов в режиме реального времени возрастает, поскольку железнодорожный транспорт остается ключевым элементом мировой логистики и пассажирских перевозок. В условиях роста интенсивности движения, увеличения скоростей и ужесточения требований к безопасности обнаружение аномалий движения подвижного состава становится критически важной задачей. **Цель:** обоснование выбора алгоритма позиционирования подвижного состава на основе нечеткой логики (Такаги — Сугено или Мамдани) при возникновении аномалии движения и определение уровня риска возникновения аномалии. **Результаты:** проведены компьютерные сценарные эксперименты с рассматриваемыми входными данными, характеризующими основные параметры движения (скорость, вибрация, ускорение, погодные условия, состояние рельсового пути) для обеспечения безопасности применительно к участкам железнодорожных путей. **Обсуждение:** проведенные эксперименты показали, что алгоритм Такаги — Сугено эффективно определяет уровень риска аномалий движения.

Ключевые слова: позиционирование, координаты объекта, транспортные объекты, аномалии движения, нечеткая логика, безопасность движения, алгоритм Такаги — Сугено, алгоритм Мамдани

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); **2.9.8** — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Введение

В условиях интенсивного развития железнодорожного транспорта и роста требований к безопасности и эффективности перевозок задача *точного позиционирования* подвижного состава (ПС) приобретает особую значимость. Современные железнодорожные системы сталкиваются с комплексом взаимосвязанных проблем. К ним можно отнести:

1. Технологические ограничения: погрешности спутников, низкая частота обновления данных и др.
2. Эксплуатационные факторы: дефекты пути следования, негативные погодные условия и др.
3. Экономические аспекты: высокая стоимость оборудования, высокая стоимость обслуживания оборудования, убытки от ложных ошибок и др.

Разработка и внедрение инновационного решения — системы нечёткого вывода для определения позиционирования подвижного состава в условиях возникновения аномалий — может существенно повысить безопасность движения за счет:

- компактного вычислительного модуля;
- возможности интеграции с существующими системами управления;
- снижения аварийности за счет прогнозирования обстановки на пути следования;
- уменьшения эксплуатационных расходов и др.

Классификация аномалий движения

Классифицировать аномалии движения подвижного состава на железной дороге можно по следующим признакам:

- природа возникновения;
- характер проявления;
- степень опасности;
- методы обнаружения.

Рассмотрим классификацию и примеры основных видов аномалий [1–3].

По природе возникновения:

1. Технические аномалии:
 - буксование и юз колесных пар (проскальзывание при разгоне/торможении);
 - отказ систем управления (система автоматического управления торможением поездов, САУТ);

- неисправности датчиков (тахогенераторов, инерциальных систем, GPS/ГЛОНАСС);

- разрыв автосцепки (нерасчетное разделение состава).

2. Инфраструктурные аномалии:

- дефекты пути (просадки, изломы рельсов, волнообразный износ);

- отказы стрелочных переводов (неперевод стрелки, ложная индикация);

- обрушение контактной сети (для электрифицированных линий).

3. Эксплуатационные аномалии:

- превышение скорости (в том числе из-за ошибок машиниста или систем);

- неправильное следование маршруту (проезд запрещающего сигнала, движение по занятому пути);

- сход с рельсов (из-за дефектов пути, перегруза).

4. Внешние воздействия:

- стихийные бедствия (оползни, наводнения, снежные заносы);

- столкновения с посторонними объектами (автотранспорт, деревья, животные);

- вандализм и террористические акты (разрушение инфраструктуры, минирование).

По характеру проявления:

1. Внезапные (импульсные) аномалии:

- резкая остановка из-за экстренного торможения;
- разрыв состава;
- столкновение с препятствием.

2. Постепенно развивающиеся аномалии:

- нарастающая вибрация из-за дефектов колесных пар;

- постепенное ухудшение сцепления (гололед на рельсах);

- дрейф показаний датчиков позиционирования.

3. Периодические (циклические) аномалии:

- вибрации от неровностей пути (волнообразный износ);

- ложные срабатывания систем безопасности из-за помех.

По степени опасности:

1. Критические:

- сход с рельсов;

- столкновение;
 - разрыв автосцепки и др.
2. Значительные:
- буксование;
 - перегруз;
 - проезд на запрещающий сигнал и др.
3. Умеренные:
- временная потеря GPS;
 - ложные сигналы датчиков и др.
4. Незначительные:
- легкая вибрация;
 - кратковременные помехи связи и др.

По методам обнаружения:

1. Автоматические системы:
- система автоматического управления торможением (САУТ) — реагирует на превышение скорости;
 - автоматическая локомотивная сигнализация (АЛСН) — контролирует сигналы и скорость;
 - дефектоскопия пути (ультразвуковая, рентгеновская).
2. Визуальный и инструментальный контроль:
- осмотр машинистом и путевыми обходчиками;
 - видеоанализ с камер наблюдения.
3. Прогнозные методы (AI, машинное обучение):
- анализ данных телеметрии для предсказания отказов;
 - выявление аномалий в режиме реального времени.

Классификация аномалий движения ПС позволяет систематизировать риски и выбирать оптимальные методы их предотвращения. Наиболее опасные — критические аномалии (сходы, столкновения), требующие многоуровневой защиты (автоматика + дублирующие системы).

Сравнение средств обнаружения аномалий движения подвижного состава с алгоритмами Такаги — Сугено и Мамдани

Современные системы мониторинга железнодорожного транспорта делятся на две основных категории определения аномалий движения: аппаратные и программные [4–6]. Эти категории, в свою очередь, имеют следующие классификации:

1. Аппаратные системы (датчики и телеметрия):

- тахогенераторы и инерциальные датчики — контроль скорости, ускорения, вибрации;
- радиочастотные метки (RFID, Eurobalise) — точное позиционирование [7, 8];
- видеоаналитика (камеры, ИК-сенсоры) — обнаружение препятствий, дефектов пути.

2. Программные методы:

- автоматизированные системы управления (САУТ, ETCS (European Train Control System, европейская система управления поездами)) — контроль скорости, торможения;
- статистические методы (контрольные карты, ARIMA (авторегрессионное интегрированное скользящее среднее)) — выявление отклонений от нормы;
- машинное обучение (SVM (метод опорных векторов)) — классификация аномалий;
- глубокое обучение (нейронные сети (LSTM, CNN)) — прогнозирование сложных аномалий;
- гибридные системы (AI + экспертные правила) — комбинация аналитики и логики.

Для выделения алгоритмов нечеткого вывода проведем сравнительную характеристику их с указанными средствами определения аномалий (табл. 1).

В ходе сравнения основными ключевыми преимуществами алгоритмов нечеткого вывода выделены:

- объяснимость решений — правила «если..., то...» понятны инженерам;
- работа с неполными данными — не требует больших обучающих выборок;
- быстрая адаптация — правила можно корректировать без переобучения модели.

Из недостатков алгоритмов можно выделить:

- сложные аномалии (например, комбинация дефектов пути + сбой датчиков);
- динамически меняющиеся условия (нужна постоянная корректировка правил).

Алгоритм Мамдани базируется на нечеткой логике, позволяет интерпретировать правила вывода подобно человеческому мышлению. Однако настройки правил сложнее, чем в модели Такаги — Сугено, а производительность зависит от количества используемых лингвистических переменных и функций принадлежности.

Таблица 1

Сравнительная характеристика средств определения аномалий

Критерии	Алгоритмы нечеткого вывода	Аппаратные системы	ML/DL	Гибридные системы
Интерпретируемость	База правил	Зависимость от датчиков	«Черный ящик»	Зависит от множества факторов
Работа в реальном времени	Низкие задержки	Зависимость от связи	Ресурсоемкость	Зависит от совокупности факторов
Гибкость правил	Легкая настройка	Жесткая логика	Низкая	Высокая
Требования к данным	Низкие (не требует обучения)	Зависимость от датчиков	Высокие	Высокие
Устойчивость к шумам	Зависит от настроек	Высокая чувствительность к помехам	Устойчивы при обработанном большом количестве информации	Высокая

Несмотря на то, что алгоритм Мамдани также относится к методам, основанным на правилах, сложность реализации и необходимость подбора оптимальных функций принадлежности делают настройку менее гибкой и удобной, особенно при динамических изменениях условий мониторинга.

Математические модели обнаружения аномалий подвижного состава на основе алгоритмов Такаги — Сугено и Мамдани

Формальная постановка задачи

Входными переменными для определения аномалий движения являются:

- v — скорость;
- $\dot{\omega}$ — вибрация;
- α — ускорение;
- Ω — погодные условия;
- γ — состояние рельсового пути.

Выходной переменной является уровень риска R .

Фаззификация входных переменных

Для каждой входной переменной определяем функции принадлежности согласно алгоритму Мамдани [9]:

1. Скорость:

$$M_{v,low}(v) = \begin{cases} 1, v \leq 60, \\ (80 - v) / 20, 60 < v < 80, \\ 0, v \geq 80. \end{cases}$$

$$M_{v,normal}(v) = \begin{cases} v / 60, v < 60, \\ 1, 60 \leq v \leq 80, \\ (v - 80) / 80, 80 < v < 160, \\ 0, v \geq 160. \end{cases}$$

$$M_{v,high}(v) = \begin{cases} 0, v \leq 140 \\ (v - 140) / 20, 140 < v < 160, \\ 1, v \geq 160. \end{cases}$$

2. Вибрация:

$$\mu_{\dot{\omega},low}(\dot{\omega}) = \begin{cases} 1, \dot{\omega} \leq 0,3, \\ (0,5 - \dot{\omega}) / 0,2, 0,3 < \dot{\omega} < 0,5, \\ 0, \dot{\omega} \geq 0,5. \end{cases}$$

$$\mu_{\dot{\omega},normal}(\dot{\omega}) = \begin{cases} 0, \dot{\omega} \leq 0,3, \\ (\dot{\omega} - 0,3) / 0,3, 0,3 < \dot{\omega} < 0,5, \\ (0,7 - \dot{\omega}) / 0,2, 0,5 \leq \dot{\omega} < 0,7, \\ 0, \dot{\omega} \geq 0,7. \end{cases}$$

$$\mu_{\dot{\omega},high}(\dot{\omega}) = \begin{cases} 0, \dot{\omega} \leq 0,6, \\ (\dot{\omega} - 0,6) / 0,1, 0,6 < \dot{\omega} < 0,7, \\ 1, \dot{\omega} \geq 0,7. \end{cases}$$

3. Погодные условия:

$$\mu_{\Omega,dry}(\Omega) = \begin{cases} 1, \Omega \leq 0,3, \\ (0,5 - \Omega) / 0,2, 0,3 < \Omega < 0,5, \\ 0, \Omega \geq 0,5. \end{cases}$$

$$\mu_{\Omega,rain}(\Omega) = \begin{cases} 0, \Omega \leq 0,4, \\ (\Omega - 0,4) / 0,2, 0,4 < \Omega < 0,6, \\ (0,8 - \Omega) / 0,2, 0,6 \leq \Omega < 0,8, \\ 0, \Omega \geq 0,8. \end{cases}$$

$$\mu_{\Omega,snow}(\Omega) = \begin{cases} 0, \Omega \leq 0,7, \\ (\Omega - 0,7) / 0,8, 0,7 < \Omega < 0,9, \\ 1, \Omega \geq 0,9. \end{cases}$$

4. Состояние рельсового пути:

$$\mu_{\gamma, \text{good}}(\gamma) = \begin{cases} 1, \gamma \leq 0,3, \\ (0,5 - \gamma) / 0,2, 0,3 < \gamma < 0,5, \\ 0, \gamma \geq 0,5. \end{cases}$$

$$\mu_{\gamma, \text{fair}}(\gamma) = \begin{cases} 0, \gamma \leq 0,4, \\ (\gamma - 0,4) / 0,2, 0,4 < \gamma < 0,6, \\ (0,8 - \gamma) / 0,2, 0,6 \leq \gamma < 0,8, \\ 0, \gamma \geq 0,8. \end{cases}$$

$$\mu_{\gamma, \text{poor}}(\gamma) = \begin{cases} 0, \gamma \leq 0,7, \\ (\gamma - 0,7) / 0,2, 0,7 < \gamma < 0,9, \\ 1, \gamma \geq 0,9. \end{cases}$$

5. Ускорение:

$$\mu_{\alpha, \text{отрицательное}}(\alpha) = \begin{cases} 1, \alpha < -1,5, \\ 0,5 - \alpha, -1,5 < \alpha < -0,5, \\ 0, \text{иначе.} \end{cases}$$

$$\mu_{\alpha, \text{нулевое}}(\alpha) = \begin{cases} (\alpha + 1) / 0,5, -1 < \alpha < -0,5, \\ 1, -0,5 < \alpha \leq 0,5, \\ (1 - \alpha) / 0,5, 0,5 < \alpha < 1, \\ 0, \text{иначе.} \end{cases}$$

$$\mu_{\alpha, \text{положительное}}(\alpha) = \begin{cases} \alpha - 0,5, 0,5 < \alpha \leq 1,5, \\ 1, \alpha \geq 1,5, \\ 0, \text{иначе.} \end{cases}$$

Для каждой входной переменной определяем функции принадлежности согласно алгоритму Такаги — Сугено следующего вида:

- *скорость*: низкая, средняя, высокая;
- *ускорение*: отрицательное, нулевое, положительное;
- *вибрация*: слабая, умеренная, сильная;
- *погодные условия*: идеальные, неблагоприятные, экстремальные;
- *состояние рельсового пути*: удовлетворительное, хорошее, отличное.

Создание базы правил

Правила, используемые в системе, согласно алгоритму Мамдани, имеют следующий вид:

R_i : ЕСЛИ (v есть A_i) И ($\dot{\omega}$ есть B_i) И (α есть C_i) И (Ω есть D_i) И (γ есть E_i), ТО

$$r_i = f_i(v, \dot{\omega}, \alpha, \Omega, \gamma).$$

Примеры правил:

1. ЕСЛИ v низкая И $\dot{\omega}$ низкая, ТО $r_1 = 0,1$.
2. ЕСЛИ v высокая И $\dot{\omega}$ средняя, ТО $r_2 = 0,7$.
3. ЕСЛИ v высокая И α отрицательное, ТО $r_3 = 0,9$.

Правила, используемые в системе, согласно алгоритму Такаги — Сугено, имеют следующий вид:

ЕСЛИ v высокая И α положительное И Ω отличное, ТО

$$R = k_1 \cdot v + k_2 \cdot \alpha + k_3 \cdot \Omega.$$

Агрегирование правил и дефаззификация

Согласно алгоритму Мамдани уровень риска (выход системы) вычисляется как

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot r_i}{\sum_{i=1}^N w_i}.$$

Согласно алгоритму Такаги — Сугено уровень риска определяется соотношением вида:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot f_i(v, a, w, c, t)}{\sum_{i=1}^N w_i}.$$

Описанная модель на основе нечеткого вывода позволяет качественно и быстро оценить риск возникновения аномалий движения, спрогнозировать опасные ситуации на пути следования транспортного средства, адаптироваться к быстроизменяющимся условиям окружающей среды и может выступать отдельным модулем в большой интеграционной системе автоматического управления транспортным средством.

Пример обнаружения аномалий движения поезда с использованием алгоритма Такаги — Сугено на Python

На рис. 1 и 2 представлена 3D-визуализация зависимости аномалии от скорости и ускорения поезда и от скорости и вибрации, построенная по результатам работы алгоритма Такаги — Сугено для определения аномалий движения поезда, основанная на таких входных переменных, как *скорость*, *ускорение*, *вибрация* и *отклонение от маршрута*.

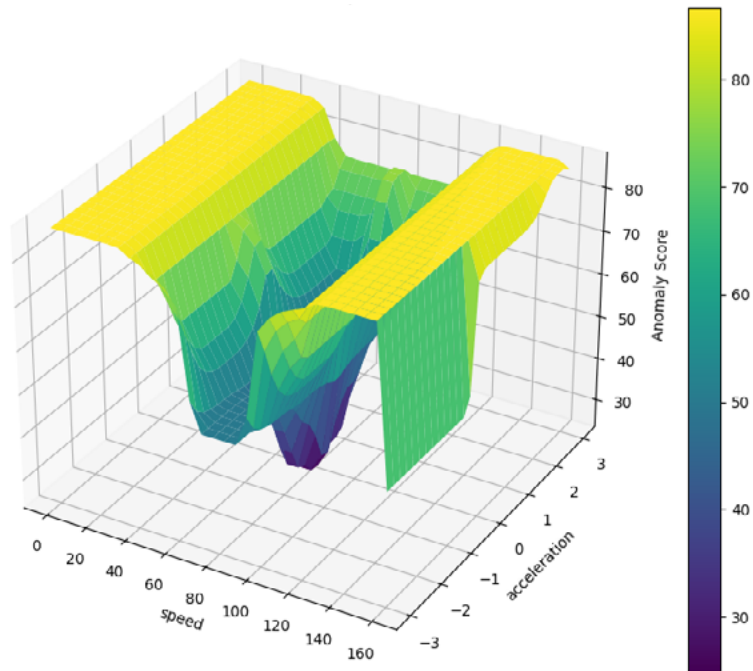


Рис. 1. Зависимость возникновения аномалии от скорости и ускорения

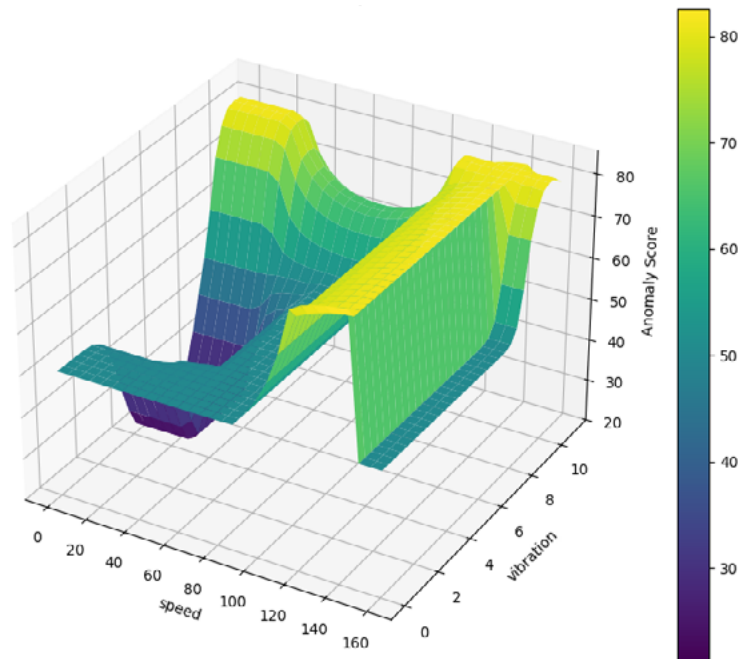


Рис. 2. Зависимость аномалии от скорости и вибрации

Результаты обнаружения аномалий:

Скорость: 80 км/ч, Ускорение: 0.0 м/с², Вибрация: 2.0, Отклонение: 5.0 м → Оценка: 21.2% (NORMAL)
 Скорость: 120 км/ч, Ускорение: -0.8 м/с², Вибрация: 3.5, Отклонение: 8.0 м → Оценка: 57.4% (WARNING)
 Скорость: 90 км/ч, Ускорение: 1.5 м/с², Вибрация: 6.0, Отклонение: 15.0 м → Оценка: 64.3% (WARNING)
 Скорость: 150 км/ч, Ускорение: -2.5 м/с², Вибрация: 8.5, Отклонение: 60.0 м → Оценка: 86.7% (DANGER)
 Скорость: 40 км/ч, Ускорение: 0.0 м/с², Вибрация: 9.0, Отклонение: 0.0 м → Оценка: 80.4% (DANGER)

Рис. 3. Вероятностная оценка появления аномалий в ходе выполнения сценариев движения поезда

В качестве выходной переменной определен *уровень риска* (оценка аномалии) движения подвижного состава.

В ходе выполнения программы реализованы сценарии, результаты которых представлены на рис. 3.

Основные особенности реализации заключаются в:

1. Возможности настройки расширенного набора параметров, таких как:

- скорость (4 уровня);
- ускорение/торможение (5 уровней);
- вибрация (3 уровня);
- отклонение от маршрута (4 уровня).

2. Гибкости настройки системы правил:

- множество правил для разных комбинаций параметров;
- четкое разделение на нормальные/предупреждающие/опасные состояния.

3. Визуализации:

- графики функций принадлежности для всех параметров;
- 3D-поверхности зависимости аномалий от пар параметров;
- автоматическое сохранение графиков в файлы.

4. Возможности тестирования различных сценариев.

5. Простой и понятной интерпретации результатов:

- NORMAL (0–30 %) — нормальная работа;
- WARNING (30–70 %) — потенциальные проблемы;
- DANGER (70–100 %) — опасная ситуация.

Сравнение алгоритмов Мамдани и Такаги — Сугено для ж/д аномалий приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ключевые отличия алгоритмов нечеткого вывода

Критерий	Мамдани	Такаги — Сугено
Выход	Лингвистические правила	Числовые значения
Скорость	Медленнее (дефазификация)	Быстрее
Интерпретация	Высокая	Низкая
Точность	Ниже	Выше

Вывод. Для задачи мониторинга аномалий на железной дороге алгоритм Такаги — Сугено подходит лучше благодаря скорости, точности и совместимости с автоматизированными системами. Однако если требуется максимальная прозрачность решений, стоит рассмотреть алгоритм Мамдани или гибридную схему (расчет через Такаги — Сугено + объяснения Мамдани).

Заключение

Разработанная программная система определения риска возникновения аномалий движения представляет собой интеллектуальную систему мониторинга, способную в реальном времени анализировать параметры движения поезда и выявлять потенциально опасные ситуации. Использование нечеткой логики Такаги — Сугено обеспечивает ряд ключевых преимуществ по сравнению с традиционными методами машинного обучения и статистического анализа.

Основными преимуществами разработанной системы являются:

1. Гибкость и адаптивность:

- нечеткие правила позволяют учитывать сложные взаимосвязи между параметрами (скорость, ускорение, вибрация, отклонение от маршрута), которые трудно описать точными математическими моделями;
- легкость настройки под конкретные условия эксплуатации (разные типы поездов, рельсовых путей, климатические зоны).

2. Интерпретируемость полученных сигналов и решений: например, в отличие от «черного ящика», которым характеризуются нейросети, система выдает свой прогноз через понятные правила: «ЕСЛИ скорость высокая И вибрация сильная, ТО риск аварии повышен».

3. Устойчивость к зашумленным данным: нечеткая логика не требует идеально точных данных с датчиков, что особенно важно в условиях погрешностей получаемых данных от спутниковых технологий, вибрационных помех, задержек в получении данных и др.

4. Эффективность применения в реальном масштабе времени за счет низких вычислительных затрат.

5. Возможность интеграции с другими программными и аппаратными средствами определения позиционирования транспортного средства и прогнозирования состояния пути следования.

Сценарные эксперименты показали высокую точность интерпретируемости и расчетов. Система может быть интегрирована с системами мониторинга железной дороги для реального обнаружения аномалий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Казюк С. Б. Анализ систем позиционирования подвижного состава / С. Б. Казюк; науч. рук. А. Т. Попов // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета (Липецк, Россия, 29 июня 2012 г.): в 2 ч. Ч. 2. Липецк: Липецкий гос. технический ун-т, 2012. С. 42–44.
2. Туманова Н. В., Баврина А. А., Медведева В. М. Классификация нарушений безопасности движения на железнодорожном транспорте // Техносферная безопасность городских агломераций: Сборник материалов II Международной школы-конференции (Москва, Россия, 15–16 декабря 2021 г.). М.: РУТ (МИИТ): РОАТ, 2022. С. 275–280.
3. Калачева О. А., Прицепова С. А. Анализ нарушений безопасности движения поездов // Актуальные проблемы железнодорожного транспорта: сборник статей научной конференции (Воронеж, Россия, 01 октября 2018 г.). Воронеж: филиал РГУПС в г. Воронеж, 2018. С. 96–100.
4. Сайфутдинов А. В. Выявление аномалий трафика в информационных системах с использованием методов Machine Learning // Перспективы науки. 2023. № 8 (167). С. 53–58.
5. Шевчук В. Г., Левтринский В. В., Крюкова Д. К. Подсистема мониторинга железнодорожного моста как важная составляющая системы спутникового мониторинга инфраструктуры железной дороги // Строительство и восстановление искусственных сооружений: материалы V Международной научно-практической конференции (Гомель, Беларусь, 21–22 апреля 2016 г.): в 2 ч. Ч. 1. / под общ. ред. А. А. Поддубного. Гомель: Белорусский гос. ун-т транспорта, 2016. С. 325–330.
6. Безручко В. В. Разработка автоматизированной системы контроля и диагностирования устройств передачи информации железнодорожного транспорта: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.08 / Безручко Валерий Владимирович [Место защиты: Рос. гос. открытый ун-т путей сообщения]. М., 1997. 24 с.
7. Фоменко Ю. С., Хомоненко А. Д. Определение координат транспортного объекта при дефиците сигналов с помощью модели нечеткого вывода Такаги — Сугено // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 46–55. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-46-55.
8. Fault Detection and Diagnostic Methods for Railway Systems — A Literature Survey / J. Wróbel, P. Bury, M. Zajac [et al.] // Advances in Science and Technology Research Journal. 2024. Vol. 18, Iss. 6. Pp. 361–391. DOI: 10.12913/22998624/191762.
9. Технологии искусственного интеллекта: учебник / под общ. ред. В. В. Ефимова и А. Д. Хомоненко. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2024.

Дата поступления: 05.08.2025

Решение о публикации: 08.08.2025

Positioning of Rolling Stock Based on Fuzzy Logic Algorithms for Detecting Transport Movement Anomalies

Yulia S. Fomenko¹

— Master, Postgraduate Student of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, fuzzy intelligent systems, artificial intelligence systems. E-mail: yu.srgvn@gmail.com

Anatoly D. Khomonenko^{1,2}

— Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Information and Computing Systems Department; Professor of the Mathematical and Software Engineering Department. Research interests: information systems, big data processing, probabilistic modelling of geographic information systems, genetic algorithms, information security. E-mail: khomon@mail.ru

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, Russia, 190031

²Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, Russia, 197198

For citation: Fomenko Yu. S., Khomonenko A. D. Positioning of Rolling Stock Based on Fuzzy Logic Algorithms for Detecting Transport Movement Anomalies. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 3 (43), Pp. 77–86. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-77-86. (In Russian)

Abstract. *Real-time detection of transport movement anomalies has attracted significant attention, since railway transport remains a key element of global logistics and passenger transportation. In the context of increasing traffic intensity, rising speeds and more stringent safety requirements, the identification of anomalies in the movement of rolling stock has become a critical task. **Purpose:** the selection of an algorithm for the positioning of rolling stock based on fuzzy logic (Takagi — Sugeno or Mamdani) is a justified choice in the event of a movement anomaly, as is the determination of the risk level of anomaly occurrence. **Results:** computerized scenario experiments have been conducted with the considered input data characterizing the main movement parameters (speed, vibration, acceleration, weather conditions, track condition) to ensure safety on railway sections. **Discussion:** the experimental results demonstrated the efficacy of the Takagi — Sugeno algorithm in determining the risk level of movement anomalies.*

Keywords: *positioning, object coordinates, transport facilities, movement anomalies, fuzzy logic, traffic safety, Takagi — Sugeno algorithm, Mamdani algorithm*

REFERENCES

1. Kazyuk S. B. Analiz sistem pozitsionirovaniya podvizhnogo sostava [Analysis of rolling stock positioning systems], *Sbornik tezisev dokladov nauchnoy konferentsii studentov i aspirantov Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Collection of abstracts of reports of the scientific conference of students and postgraduates of Lipetsk State Technical University]*, Lipetsk, Russia, June 29, 2012. Vol. 2. Lipetsk, Lipetsk State Technical University, 2012, Pp. 42–44. (In Russian)
2. Tumanova N. V., Bavrina A. A., Medvedeva V. M. Klassifikatsiya narusheniy bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte [Classification of Traffic Safety Violations in Rail Transport], *Tekhnosfernaya bezopasnost gorodskikh aglomeratsiy: Sbornik materialov II Mezhdunarodnoy shkoly-konferentsii [Technosphere safety of urban agglomerations: Collection of materials of the II International school-conference]*, Moscow, Russia, December 15–16, 2021. Moscow, Russian University of Transport, Russian Open Academy of Transport, 2022, Pp. 275–280. (In Russian)

3. Kalacheva O. A., Pritsepova S. A. Analiz narusheniy bezopasnosti dvizheniya poezdov [Analysis of violations of train traffic safety], *Aktualnye problemy zheleznodorozhnogo transporta: sbornik statey nauchnoy konferentsii* [Actual problems of railway transport: collection of articles from a scientific conference], Voronezh, Russia, October 01, 2018. Voronezh, Voronezh Branch of Rostov State Transport University, 2018, Pp. 96–100. (In Russian)
4. Sayfutdinov A. V. Vyyavlenie anomalii trafika v informatsionnykh sistemakh s ispolzovaniem metodov Machine Learning [Detection of Traffic Anomalies in Information Systems Using Machine Learning Methods], *Perspektivy nauki* [Science Prospects], 2023, No. 8 (167), Pp. 53–58. (In Russian)
5. Shevchuk V. G., Levtrinsky V. V., Kryukova D. K. Podсистема monitoringa zheleznodorozhnogo mosta kak vazhnaya sostavlyayushchaya sistema sputnikovogo monitoringa infrastruktury zheleznoy dorogi [Subsystem for monitoring a railway bridge as an important component of the satellite monitoring system for railway infrastructure], *Stroitelstvo i vosstanovlenie iskusstvennykh sooruzheniy: materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Construction and restoration of artificial structures: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference], Gomel, Belarus, April 21–22, 2016. Vol. 1. Gomel, Belarusian State University of Transport, 2016, Pp. 325–330. (In Russian)
6. Bezruchko V. V. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy kontrolya i diagnostirovaniya ustroystv peredachi informatsii zheleznodorozhnogo transporta [Development of an automated system for monitoring and diagnosing railway information transmission devices]: Abstract of the diss. on competition of a scientific degree PhD (Engin.). Moscow, Russian State Open Technical University of Transport, 1997, 24 p. (In Russian)
7. Fomenko Yu. S., Khomonenko A. D. Opredelenie koordinat transportnogo obekta pri defitsite signalov s pomoshchyu modeli nechetkogo vyvoda Takagi — Sugeno [Detection of Transport Object Coordinates Under Signal Scarcity Using Takagi — Sugeno Fuzzy Inference Model], *Intellektualnye tekhnologii na transporte* [Intellectual Technologies on Transport], 2025, No. 1 (41), Pp. 46–55. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-46-55. (In Russian)
8. Wróbel J., Bury P., Zając M., et al. Fault Detection and Diagnostic Methods for Railway Systems — A Literature Survey, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2024, Vol. 18, Iss. 6, Pp. 361–391. DOI: 10.12913/22998624/191762.
9. Efimov V. V., Khomonenko A. D. (eds.). Tekhnologii iskusstvennogo intellekta: uchebnik [Artificial Intelligence Technologies: textbook]. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Aerospace Academy, 2024. (In Russian)

Received: 05.08.2025

Accepted: 08.08.2025