

Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности I



Том 11 Номер 5 (67)



2026



СОДЕРЖАНИЕ / CONTENT

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

-
- | | | |
|---|--|---|
| 1. | Денискин А.В., Козлов А.М., Алиев Э.А. Шарапова О.В. (научный руководитель) Роль владения английским языком в процессе освоения языков программирования: сравнительный анализ лингвистических и синтаксических структур | 5 |
| Deniskin A.V., Kozlov A.M., Aliev E.A., Sharapova O.V. (Academic Supervisor) The role of english language proficiency in learning programming languages: a comparative analysis of linguistic and syntactic structures | | |
-
- | | | |
|---|--|----|
| 2. | Макаров А.Е., Зяблицева О.В. Мобильное приложение расписание для студентов КГТУ | 10 |
| Makarov A.E., Zyablitseva O.V. Mobile schedule application for KSTU students | | |
-
- | | | |
|---|--|----|
| 3. | Ефимов Н.А. AGILE в бирюзовой модели управления: путь к самоорганизации | 16 |
| Efimov N.A. AGILE in teal organizations: the path to self-management | | |
-
- | | | |
|---|---|----|
| 4. | Ибишов Т.С., Коростелев Д.А. Организация STAGING слоя в СУБД GREENPLUM, устойчивого к эволюции схемы источников данных, в фреймворке BI.QUBE | 26 |
| Ibishov T.S., Korostelev D.A. Organizing a STAGING layer in a GREENPLUM DBMS, resilient to data source schema evolution, using the BI.QUBE framework | | |
-
- | | | |
|---|--|----|
| 5. | Колдаев Т.А., Евдoshenko О.И. (научный руководитель) Корреляция сетевой телеметрии и журналов событий для обнаружения несанкционированного доступа в АСУ ТП | 34 |
| Koldaev T.A., Evdoshenko O.I. (Academic Supervisor) Correlation of network telemetry and event logs to detect unauthorized access to an APCS | | |
-
- | | | |
|--|---|----|
| 6. | Башкирев М.В., Харитonenkov А.И. Исследование технологий тактильной обратной связи в системах виртуальной реальности | 41 |
| Bashkirev M.V., Kharitonenkov A.I. Research of hactile feedback technologies in virtual reality systems | | |
-
- | | | |
|--|--|----|
| 7. | Теремов И.А. Развитие методов классификации текстов: от статистических моделей к большим языковым моделям | 48 |
| Teremov I.A. Development of text classification methods: from statistical models to large language models | | |
-
- | | | |
|--|---|----|
| 8. | Олиппиев С.А., Неклюдов А.В. Проблема компенсации погрешностей в неконтролируемые параметры при решении задачи согласования данных | 61 |
| Olimpiyev S.A., Neklyudov A.V. The problem of compensating for errors in uncontrolled parameters when solving the data coordination problem | | |
-

9.	Дабезжа И.И. Исследование влияния параметров управления подтверждениями на производительность протокола QUIC	67
	Dabezha I.I. Study of acknowledgment management parameters impact on QUIC protocol performance	
10.	Набатов Н.Н. Системный анализ процессов передачи и приёма видеотелеметрической информации бортовой системы видеоконтроля ракет-носителей	72
	Nabatov N.N. System analysis of processes of transmission and reception of video telemetry information of the onboard video monitoring system of launch vehicles	
11.	Шабров Т.С. Прогнозирование нагрузки, температуры и остаточного заряда батареи электромобиля с использованием методов машинного обучения	89
	Shabrov T.S. Forecasting the load, temperature and state of charge of an electric vehicle battery using machine learning methods	
12.	Вафин Б.Р. Сравнительный анализ методов машинного обучения для прогнозирования снижения учебной вовлечённости школьников	99
	Vafin B.R. Comparative analysis of machine learning methods for predicting decline in school students' academic engagement	
13.	Часов П.С., Сараев П.В. Анализ речевого паттерна комика как основа прогнозной модели для синтеза реплик в задачах постобработки комедийных выступлений	107
	Chasov P.S., Saraev P.V. The analysis of the comedian's speech pattern as the basis of a predictive model for the synthesis of cues in the tasks of post-processing comedic performances	
14.	Балашов О.В., Букачев Д.С. Способ восстановления функции полезности на основе лингвистических оценок предпочтений и истинности для принятия решений в организационно-технических системах	117
	Balashov O.V., Bukachev D.S. A method for restoring the utility function based on linguistic assessments of preferences and truth for decision-making in organizational and technical systems	
ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ		
15.	Аленин А.С. Почему токосъемник на электровозах не может иметь округлую форму?	124
	Alenin A.S. Why can't a current collector on electric locomotives have a rounded shape?	
16.	Хайруллина Л.М., Фаизов М.Р. ТОКАМАК как основа управляемого термоядерного синтеза: устройство, принцип работы и современные проблемы реализации	
	Khairullina L.M., Faizov M.R. TOKAMAK as the basis of controlled thermonuclear fusion: device, operating principle, and modern implementation problems	
17.	Банщикова В.Д., Логинова М.М., Какауоров С.В. Влияние высших гармоник на стабильность электросетей и современные методы фильтрации	
	Banshchikova V.D., Loginova M.M., Kakaurov S.V. The influence of higher harmonics on the stability of electric grid and modern filtration method	

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

18. **Мокряк А.В.** Диагностические признаки аварийного режима литий-ионного аккумулятора по морфологии повреждений корпуса **142**

Mokryak A.V. Diagnostic signs of lithium-ion battery accident mode by morphology of case damage

19. **Мокряк А.В.** Морфология термических повреждений судового кабеля СПОВ 3×1 при воздействии сверхтоков различной кратности **148**

Mokryak A.V. Morphology of thermal damages of the SPOV 3×1 ship cable under the influence of overcurrents of various multiplicity

20. **Назаров Н.В.** Применение различных видов анкеров подпорных стенок в стеснённых городских условиях

Nazarov N.V. The use of various types of retaining wall anchors in cramped urban environments

21. **Таймасханов М.М., Хегай А.О. (научный руководитель)** Влияние повторных сейсмических воздействий на безопасность зданий и сооружений **160**

Taimaskhanov M.M., Kheday A.O. (Academic Supervisor) Influence of repeated seismic impacts on the safety of buildings and structures



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.43

РОЛЬ ВЛАДЕНИЯ АНГЛИЙСКИМ ЯЗЫКОМ В ПРОЦЕССЕ ОСВОЕНИЯ ЯЗЫКОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ И СИНТАКСИЧЕСКИХ СТРУКТУР

¹Денискин А.В., Козлов А.М., Алиев Э.А., Шарапова О.В. (научный руководитель)
ФГБОУ ВО «МИРЭА - РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Москва,
Россия (119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78, стр. 4), e-mail: ¹drewbs.1@mail.ru

В статье исследуется взаимосвязь английского языка и языков программирования в контексте обучения начинающих программистов на основе обзора научной литературы. Особое внимание уделяется трудностям, с которыми сталкиваются учащиеся, для которых английский не является родным, включая дополнительную когнитивную нагрузку. Проведен сравнительный анализ естественного и формального языков с учётом их структурного сходства, рассмотрены социокультурные и психологические факторы обучения. Делается вывод о двойственной роли английского языка как необходимого и одновременно усложняющего процесс освоения программирования. Подчёркивается необходимость дальнейших исследований оптимальных моделей обучения с учётом языкового компонента.

Ключевые слова: Английский язык; языки программирования; обучение; когнитивная нагрузка; сравнительный анализ.

THE ROLE OF ENGLISH LANGUAGE PROFICIENCY IN LEARNING PROGRAMMING LANGUAGES: A COMPARATIVE ANALYSIS OF LINGUISTIC AND SYNTACTIC STRUCTURES

¹Deniskin A.V., Kozlov A.M., Aliev E.A., Sharapova O.V. (Academic Supervisor)
MIREA - RUSSIAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, Moscow, Russia (119454, Moscow, avenue
Vernadsky, 78, b. 4), e-mail: ¹drewbs.1@mail.ru

The article examines the relationship between the English language and programming languages in the context of teaching novice programmers based on a literature review. Attention is paid to the difficulties faced by non-native English speakers, including additional cognitive load. A comparative analysis of natural and formal languages is conducted, considering their structural similarities, and sociocultural and psychological factors of learning are examined. The conclusion is drawn about the dual role of the English language as both necessary and complicating the process of mastering programming. The need for further research into optimal teaching models that account for the linguistic component is emphasized.

Keywords: English language; programming languages; learning; cognitive load; comparative analysis.

Вводное обучение компьютерному программированию — это всемирное современное явление, вызванное спросом на квалифицированных специалистов в технологической отрасли, а также постоянно растущей доступностью и снижением стоимости вычислительных устройств. Правительства в настоящее время признают важность умения управлять этими устройствами и создавать для них новые применения [3; 5]. Это видно по включению занятий по программированию на ранних этапах школьного образования, часто уже в начальной школе

[4; 5]. Методы преподавания вводного программирования учитывают когнитивные/психологические аспекты обучения [1; 2] но часто игнорируют связь между компьютерным программированием и естественным языком, который используется в самом языке программирования, в его преподавании и является родным для учащихся. Как отмечается, английский — самый распространённый язык в мире, широко используемый в таких сферах, как международная торговля, распространение знаний и любых других, где могут участвовать люди из разных языковых сред, включая компьютерное программирование [5]. Тем не менее, согласно последнему отчёту о мировых языковых статистиках, английский является родным только примерно для 5 % населения мира — позади китайского¹ и испанского (около 17 % и 6 % соответственно). Это означает, что носители английского языка получают преимущество, имея самый распространённый язык мира в качестве родного, в то время как носители других языков должны прилагать дополнительные усилия и использовать альтернативные ресурсы (когнитивные, временные и финансовые), которых у первых нет. Обзор наиболее используемых языков программирования показывает, что самые популярные из них используют английский язык в учебных и справочных материалах, а также в своих письменных компонентах, известных как ключевые слова. Эти письменные компоненты дополняют логические и математические символы и обозначения, используемые для создания инструкций. Таким образом, носители английского и не носители английского языка, изучающие компьютерное программирование, сталкиваются с разницей в способности к усвоению материала [7; 8; 9], вызванной тем, что английский не является самым распространённым родным языком, но при этом наиболее широко используется в языках программирования. В данном исследовании рассмотрена взаимосвязь между естественным языком (английским) и языками программирования с точки зрения учащихся-неносителей английского языка (NNES), изучающих компьютерное программирование. Мы представляем сравнительный анализ языков с учётом структуры языка, процесса усвоения и социальных аспектов каждого из них. Наша цель — проанализировать, в какой степени изучение языка программирования, использующего английский, создаёт дополнительную нагрузку для учащихся-не носителей английского языка.

В ходе данного исследования был проведён обзор научной литературы, посвящённой взаимосвязи английского языка и обучения программированию. В качестве источников использовались журнальные статьи, отчёты и главы книг, отобранные через поисковые системы и специализированные базы данных. Анализ литературы позволил выявить ключевые подходы к изучению влияния английского языка на процесс освоения языков программирования, а также определить основные когнитивные и социокультурные факторы. Отбор материалов осуществлялся с учётом их актуальности (преимущественно за последние 15 лет), при этом учитывались и фундаментальные работы, формирующие теоретическую основу исследования. Такой подход обеспечил комплексный анализ рассматриваемой проблемы.

Сравнение естественных и языков программирования

Таблица 1 - Сводное сравнение языков программирования и английского языка

Компонент	Языки программирования	Английский язык
Цель	Общение «человек — машина»	Общение между людьми
Неоднозначность	Низкая	Высокая
Структура языка	Общие структурные элементы (синтаксические, семантические и морфологические компоненты)	—
Усвоение языка	Отсутствует установленная и валидированная студентоориентированная модель	Описывается различными моделями (например, Haynes (2007), Gardner (2007))
Социальный контекст	Оба языка процветают благодаря сообществам. Однако поскольку средства сохранения языка различаются, они подвержены разным условиям вымирания языка	—

Первый компонент сравнения — цель каждого языка. Хотя оба служат для обеспечения общения, они различаются по участникам. В языках программирования общение происходит между человеком (программистом), пишущим программу, и компьютером. С другой стороны, естественные языки обеспечивают общение между людьми.

В этом подразделе мы рассматриваем морфологические, синтаксические и семантические элементы как естественных, так и языков программирования. Поскольку язык программирования не имеет устной компоненты, фонетические и фонологические аспекты здесь не рассматриваются (они изучают звуки речи и системы их отношений). Как уже говорилось, язык программирования — это формальный, искусственный язык. Он создан искусственно, в отличие от естественных языков, которые развивались у людей в процессе использования и повторения. Язык программирования имеет заранее определённый набор правил и конструкций, специфичных для его цели. В этом смысле естественные и языки программирования имеют общие языковые компоненты: оба подчиняются морфологическим правилам (определяющим формы слов), синтаксическим (определяющим правильные комбинации слов и символов) и семантическим (касающимся значений этих комбинаций).

Английский и языки программирования процветают благодаря сообществам носителей и программистов соответственно. Однако эти два языка различаются по наличию социального контекста. Естественный язык нуждается в сообществе для передачи и развития. Сообщество является центральным для существования и развития языка. Один человек, даже владеющий языком, не может осуществлять общение без собеседника. Это связано с тем, что цель естественных языков включает социальный компонент — установление общения между людьми. Важный фактор выживания языка — средства его сохранения. Естественные языки вымирают, когда не остаётся носителей или никто больше не может на нём говорить (из-за поглощения доминирующим языком или вымирания носителей) [5]. Язык программирования

создан для общения «человек — машина». Для достижения цели достаточно только этих двух участников. Сообщество поддерживает развитие языка так же, как и в случае естественного языка. Но любой одиночный программист может использовать язык, и даже если все члены сообщества перестанут им пользоваться, язык продолжит существовать, если он должным образом задокументирован [10]. Преимущество языков программирования — отсутствие устной компоненты. Вымирание языка программирования связано с отсутствием использования или несовместимостью устройств, а не с исчезновением носителей.

Таким образом, установлено, что английский язык и языки программирования находятся в тесной взаимосвязи, обусловленной их структурным сходством и доминирующей ролью английского как лингва франка в сфере компьютерных наук. Выявлено, что его широкое использование в ключевых словах, терминологии, среде программирования и учебных ресурсах формирует дополнительную когнитивную нагрузку для учащихся-неносителей, требуя одновременного усвоения как профессиональных концепций, так и языковых средств их выражения. Определено, что в процессе обучения происходит как неявное, так и явное усвоение английского языка. Установлено, что эффективность освоения программирования зависит от совокупности когнитивных, социокультурных и мотивационных факторов, включая уровень владения английским языком, предшествующий опыт и степень вовлечённости в профессиональное сообщество. При этом знание английского языка выступает важным условием успешного обучения и профессиональной интеграции, несмотря на создаваемые им дополнительные трудности. Подчёркнута необходимость дальнейших исследований, направленных на разработку оптимальных моделей обучения с учётом языкового компонента.

Список литературы

1. Aktunc O. A teaching methodology for introductory programming courses using Alice // International Journal of Modern Engineering Research. – 2013. – Vol. 3, №1. – pp. 350–353.
2. Ali A., Smith D. Teaching an introductory programming language in a general education course // Journal of Information Technology Education: Innovations in Practice. – 2014. – Vol. 13. – pp. 57–67.
3. Bjarin T. Why basic coding should be a mandatory class in junior high // Time. – 2014. – 15 June.
4. Back to school: Canada lagging push to teach kids computer coding // CBC/Radio-Canada. – 2015. – 31 August.
5. Dredge S. Coding at school: A parent's guide to England's new computing curriculum // The Guardian. – 2014. – 4 September.
6. Gardner R. C. Motivation and second language acquisition // Porta Linguarum. – 2007. – №8. – pp. 9–22.
7. Goldenberg C. Teaching English language learners: What the research does—and does not—say // ESED 5234 – Master List. – 2008. – p. 27.
8. Полат Е. С. Новые педагогические и информационные технологии в системе образования. – М.: Академия, 2010. – 272 с.
9. Harper C., de Jong E. Misconceptions about teaching English language learners // Journal of Adolescent & Adult Literacy. – 2004. – Vol. 48, №2. – pp. 152–162.

10. Janzen J. Teaching English language learners in the content areas // Review of Educational Research. – 2008. – Vol. 78, №4. – pp. 1010–1038.
11. Knuth D. E. Literate programming // The Computer Journal. – 1984. – Vol. 27, №2. – pp. 97–111.
12. Роберт И. В. Современные информационные технологии в образовании. – М.: Академия, 2014. – 320 с.

References

1. Aktunc O. A teaching methodology for introductory programming courses using Alice // International Journal of Modern Engineering Research. – 2013. – Vol. 3, No. 1. – pp. 350–353.
 2. Ali A., Smith D. Teaching an introductory programming language in a general education course // Journal of Information Technology Education: Innovations in Practice. – 2014. – Vol. 13. – pp. 57–67.
 3. Bajarin T. Why basic coding should be a mandatory class in junior high // Time. – 2014. – June 15.
 4. Back to school: Canada lagging push to teach kids computer coding // CBC/Radio-Canada. – 2015. – 31 August.
 5. Dredge S. Coding at school: A parent's guide to England's new computing curriculum // The Guardian. – 2014. – September 4.
 6. Gardner R. C. Motivation and second language acquisition // Porta Linguarum. – 2007. – №8. – pp. 9–22.
 7. Goldenberg C. Teaching English language learners: What the research does—and does not—say // ESED 5234 – Master List. – 2008. – p. 27.
 8. Polat E. S. New pedagogical and information technologies in the education system. – Moscow: Academy, 2010. – p.272
 9. Harper C., de Jong E. Misconceptions about teaching English language learners // Journal of Adolescent & Adult Literacy. – 2004. – Vol. 48, №2. – P. 152–162.
 10. Janzen J. Teaching English language learners in the content areas // Review of Educational Research. – 2008. – Vol. 78, №4. – pp. 1010–1038.
 11. Knuth D. E. Literate programming // The Computer Journal. – 1984. – Vol. 27, №2. – pp. 97–111.
 12. Robert I. V. Modern information technologies in education. – Moscow: Academy, 2014. – p.320
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.09

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ РАСПИСАНИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ КГТУ

¹ Макаров А.Е., ²Зяблицева О.В.

ФГБОУ ВО "КОВРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.А.ДЕГТЯРЕВА", Ковров, Россия (601910, Владимирская область, город Ковров, ул. Маяковского, д. 19), e-mail: ¹601910aleksey15.03@mail.ru, ²zyabliceva@dksta.ru

Статья посвящена проектированию и программной реализации мобильного приложения на языке Kotlin, предназначенного для оптимизации учебного процесса студентов КГТУ. В работе детально описаны механизмы формирования сетки расписания на основе парсинга данных из таблиц Excel и интеграции актуального списка преподавателей с официального веб-ресурса ВУЗа. Особое внимание уделено применению современного декларативного фреймворка Jetpack Compose для создания высокопроизводительного интерфейса. В рамках исследования реализованы уникальные алгоритмы автоматического определения типа учебной недели («числитель/знаменатель») и встроенная система управления академическими задачами.

Ключевые слова: Мобильное приложение, расписание занятий, Kotlin, Jetpack Compose, Android-разработка, КГТУ, автоматизация обучения, архитектура MVVM, парсинг данных.

MOBILE SCHEDULE APPLICATION FOR KSTU STUDENTS

¹ Makarov A.E., ²Zyablitseva O.V.

Kovrov State Technological University, Kovrov, Russia (601910, Vladimir Region, Kovrov, Mayakovskogo st., 19), e-mail: ¹601910aleksey15.03@mail.ru, ²zyabliceva@dksta.ru

The article is devoted to the design and software implementation of a mobile application in Kotlin, designed to optimize the educational process of KSTU students. The paper describes in detail the mechanisms for generating a schedule grid based on parsing data from Excel tables and integrating the current list of teachers from the official web resource of the university. Special attention is paid to the use of the modern declarative Jetpack Compose framework for creating a high-performance interface. Within the framework of the research, unique algorithms for automatic determination of the academic week type and an integrated academic task management system have been implemented.

Keywords: Mobile application, class schedule, Kotlin, Jetpack Compose, Android development, KSTU, educational automation, MVVM architecture, data parsing.

Введение

В эпоху повсеместной цифровизации образовательного пространства высших учебных заведений эффективность обучения во многом зависит от качества инструментов самоорганизации студентов. Ковровский государственный технологический университет (КГТУ), как ведущий технический ВУЗ региона, предъявляет высокие требования к дисциплине и планированию времени. Однако традиционные формы предоставления учебных графиков — бумажные стенды или статичные файлы в формате PDF на сайте — в современных условиях оказываются недостаточно гибкими.

Объектом данного исследования является процесс навигации студента в информационном поле ВУЗа, осложненный специфической двухнедельной циклической

системой («числитель» и «знаменатель»). Проблема заключается в отсутствии единой точки доступа к актуальному графику, которая бы работала в режиме реального времени и не зависела от качества интернет-соединения в учебных корпусах.

Целью работы является проектирование и разработка полноценного Android-приложения, способного автоматизировать сбор данных о занятиях, корректно отображать текущие задачи и обеспечивать студента всей необходимой справочной информацией о преподавателях и аудиториях.

Результаты исследования

1. Проектирование программной архитектуры и выбор стека.

Для реализации проекта был выбран язык *Kotlin*, являющийся современным индустриальным стандартом Android-разработки. Его преимущества, такие как лаконичность кода и механизм *Null Safety*, позволяют минимизировать критические ошибки на этапе исполнения.

Архитектурный каркас приложения построен на базе шаблона *MVVM (Model-View-ViewModel)*. Данный выбор обоснован необходимостью четкого разделения логики обработки данных и их визуализации:

- *Model*: отвечает за работу с базой данных Room и сетевыми запросами.
- *View*: реализуется на Jetpack Compose, обеспечивая декларативное описание интерфейса.
- *ViewModel*: выступает связующим звеном, сохраняя состояние экрана при изменении конфигурации (например, при повороте устройства) и обрабатывая бизнес-логику.

В качестве системы управления базами данных (СУБД) выбрана библиотека *Room Persistence Library*. Она позволяет эффективно кэшировать данные расписания локально, что гарантирует работу приложения в условиях отсутствия связи («офлайн-режим»).

2. Разработка системы автоматизированного парсинга данных.

Одной из наиболее трудоемких задач стала обработка первичных данных. Расписание в КГТУ формируется в формате таблиц Microsoft Excel (.xlsx), которые имеют сложную вложенную структуру. Для решения этой задачи был разработан специализированный парсер на базе библиотеки *Apache POI*.

Алгоритм парсинга включает следующие этапы:

1. Идентификация структуры листа (определение факультета, курса и группы).
2. Обход ячеек с использованием регулярных выражений для выделения названия дисциплины, типа занятия (лекция/практика) и номера аудитории.
3. Разделение данных на четные и нечетные недели согласно внутренним меткам документа.
4. Валидация полученных объектов и их запись в локальную базу данных SQLite.

Таблица 1 - Техническая спецификация компонентов приложения

Уровень архитектуры	Используемая технология	Функциональное назначение
User Interface	Jetpack Compose	Декларативное построение UI-компонентов
Logic/DI	Kotlin Coroutines / Koin	Асинхронные вычисления и внедрение зависимостей
Network	Retrofit 2 / Jsoup	Взаимодействие с API и парсинг сайта ВУЗа
Database	Room Library	Реактивное хранение данных расписания

3. Интеграция с веб-ресурсами и справочными системами.

Для обеспечения полноты данных в приложение был интегрирован модуль связи с официальным сайтом университета. Используя библиотеку *Jsoup*, приложение в автоматическом режиме собирает информацию из раздела «Преподаватели». Это позволяет реализовать функцию «интеллектуального поиска», когда при нажатии на предмет студент видит не просто фамилию, а полную карточку преподавателя с указанием его кафедры и ученых степеней. Это значительно упрощает коммуникацию внутри ВУЗа.

4. Алгоритмическое решение для циклического расписания.

Ключевой функциональной особенностью является модуль расчета текущей недели. В системе образования КГТУ принято деление на «Числитель» и «Знаменатель». Разработанный алгоритм анализирует текущую дату, сопоставляет её с началом учебного года и программно определяет индекс текущей недели. В интерфейсе реализован визуальный индикатор, который подсвечивает актуальный блок занятий, минимизируя когнитивную нагрузку на пользователя.

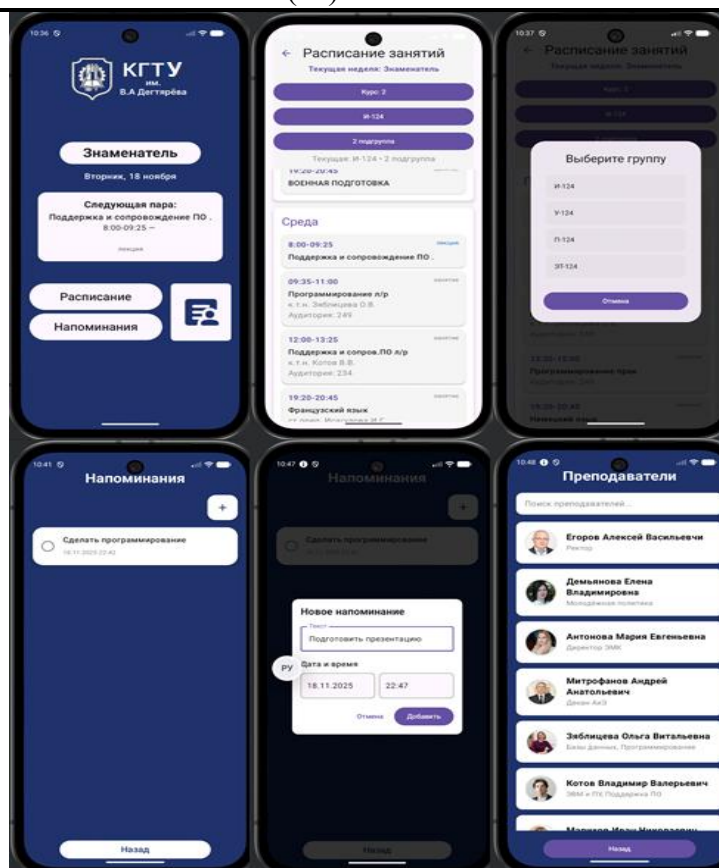


Рисунок 1 - Основные экраны мобильного приложения (Расписание, Задачи, Преподаватели)

На Рисунке 1 продемонстрированы основные навигационные узлы: экран «Сегодня», позволяющий быстро оценить ближайшее занятие, и менеджер задач с системой уведомлений.

5. Проектирование UI/UX на базе Jetpack Compose.

Использование **Jetpack Compose** позволило отойти от устаревшей системы XML-разметки. Весь интерфейс описан программно, что дает возможность легко внедрять динамические темы (например, темную тему) и плавные анимации переходов. Созданные кастомные компоненты (карточки занятий, селекторы дней) оптимизированы для управления одной рукой, что особенно удобно для студента в условиях перемещения между корпусами.

6. Система управления учебными дедлайнами.

В приложение интегрирован менеджер задач, позволяющий связывать конкретные задания (лабораторные работы, курсовые проекты) с учебными дисциплинами. Пользователь может выставить приоритеты и сроки выполнения. Благодаря интеграции с системным планировщиком Android, приложение отправляет напоминания, что способствует повышению академической успеваемости.

Заключение

В рамках проведенного исследования была спроектирована и успешно реализована мобильная информационная система для студентов КГТУ. Применение современных программных инструментов (Kotlin, Jetpack Compose, Room) позволило создать масштабируемое приложение с высокой скоростью отклика.

Научная и практическая ценность работы заключается в создании алгоритмов автоматизированного сбора данных из разнородных источников и их систематизации в едином мобильном интерфейсе. Внедрение подобных решений в учебный процесс способствует формированию единой цифровой образовательной среды университета и значительно упрощает повседневную деятельность обучающихся. В перспективе планируется расширение функционала за счет внедрения пуш-уведомлений об изменениях в расписании в реальном времени.

Список литературы

1. Руководство по разработке Android-приложений на Kotlin. [Электронный ресурс]. URL: <https://developer.android.com/kotlin> (дата обращения: 22.01.2026).
2. Документация Jetpack Compose: современные UI-интерфейсы. [Электронный ресурс]. URL: <https://developer.android.com/jetpack/compose> (дата обращения: 22.01.2026).
3. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений. — М.: Вильямс, 2020. — 544 с.
4. Голощапов А. Л. Google Android. Программирование для мобильных устройств. — 4-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2020. — 912 с.
5. Майер Р. Android. Программирование для профессионалов. — СПб.: Питер, 2017. — 672 с.
6. Харди Б., Филлипс Б. Программирование под Android. — 4-е изд. — СПб.: Питер, 2021. — 704 с.
7. Шилдт Г. Java: руководство для начинающих. — М.: Вильямс, 2019. — 816 с.
8. Официальная документация Android Room Persistence Library. [Электронный ресурс]. URL: <https://developer.android.com/training/data-storage/room> (дата обращения: 10.04.2026).
9. Мартин Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения. — СПб.: Питер, 2021. — 352 с.

References

1. Kotlin Android Development Guide. [Electronic resource]. URL: <https://developer.android.com/kotlin> (date accessed: 22.01.2026).
2. Jetpack Compose Documentation: Modern UI Interfaces. [Electronic resource]. URL: <https://developer.android.com/jetpack/compose> (date accessed: 22.01.2026).
3. Fowler, M., Architecture of Enterprise Software Applications. Moscow: Williams, 2020. p.544
4. Goloshchapov, A. L., Google Android. Programming for Mobile Devices. 4th ed. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2020. p.912
5. Mayer, R., Android. Programming for Professionals. — St. Petersburg: Piter, 2017. — p.672
6. Hardy, B., Phillips, B. Programming for Android. — 4th ed. — St. Petersburg: Piter, 2021. — p.704
7. Schildt, G. Java: A Beginner's Guide. — Moscow: Williams, 2019. — p.816
8. Official Android Room Persistence Library Documentation. [Electronic resource]. URL: <https://developer.android.com/training/data-storage/room> (accessed: 10.04.2026).

9. Martin, R. Clean Architecture: The Art of Software Development. — St. Petersburg: Piter, 2021. — p.352
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 658.5

AGILE В БИРЮЗОВОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ: ПУТЬ К САМООРГАНИЗАЦИИ

Ефимов Н.А.

ФГБОУ ВО "САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА", Санкт-Петербург, Россия
(191186, город Санкт-Петербург, Большая Морская ул., д. 18 литера а), e-mail:
lordofskies@yandex.ru

В данной статье рассматривается интеграция Agile-походов в рамках бирюзовой модели управления. Показано как принципы, заложенные в бирюзовую модель управления, сочетаются с гибкими методами разработки и дополняют их. Описываются ключевые эффекты и практическая реализация такой интеграции на примерах российских и зарубежных компаниях.

Ключевые слова: Agile, бирюзовая организация, управление проектами

AGILE IN TEAL ORGANIZATIONS: THE PATH TO SELF-MANAGEMENT

Efimov N.A.

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES AND DESIGN ,
St. Petersburg, Russia (191186, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya ul., d. 18 litera a), e-mail:
lordofskies@yandex.ru

This article examines the impact of integrating Agile approaches within the Teal management model and demonstrates how the principles of the Teal management model combine with and complement agile development methods. The article also describes the impact and practical implementation of this type of integration used by Russian and foreign companies.

Keywords: Agile, teal company, project management

Введение.

По данным исследования «The 17th State of Agile Report» 71% опрошенных используют гибкие методологии разработки (Agile) в своем жизненном цикле разработки программного обеспечения (SDLC) [1]. Однако, не стоит забывать, что основным ценностям и принципам, на которых основывается Agile и которые заложены в «Манифест гибкой разработки программного обеспечения» уже более 25 лет.

Эпоха гибких методологий, безусловно, создала принципиально новый подход к планированию и управлению проектами, опираясь на взаимоотношение людей, фокусе на рабочем продукте и готовности к изменениям на любом этапе, а также ряд устоявшихся выражений – спринт, инкремент, бэклог, стенд-ап, ретро, демо и др.

Однако, несмотря на все преимущества, которые появились благодаря Agile, реальность такова, что многие организации не могут эффективно его применять главным образом потому, что изначально они плохо подготовлены и недооценивают необходимые изменения, что часто глубоко затрагивает корпоративную культуру. Жесткость и отсутствие реальной поддержки

со стороны руководства часто приводят к тому, что компании, желающие внедрить гибкую методологию или осуществить гибкую трансформацию, обречены на провал еще до начала работы.

Стоит также отметить, что основополагающим принципом всех гибких методов является принятие общей корпоративной веры в возможность быстрой адаптации к изменениям, умение справляться с неопределенностью и фокусировка внимания на расширении возможностей членов команды. Все эти понятия лежат в концепции TEAL или бирюзовой модели управления, которая утверждает, что компаниям следует отдавать приоритет вопросам самоорганизации и самоуправления, что способствует адаптивности, целеустремленности и расширению возможностей, столь важных для внедрения гибких методологий.

Объектом статьи являются компании, практикующие бирюзовую модель управления.

Предметом статьи является использование Agile-подходов и их влияние на самоорганизацию.

Актуальность статьи подтверждается постоянно растущим интересом к Agile-подходам и концепции бирюзового управления в различных сферах деятельности.

Сущность и основные принципы бирюзовых организаций

В России, по обновленным данным Единого реестра субъектов МСП, по состоянию на начало января 2026 года насчитывается 6 млн 835 тыс. малых и средних предприятий, тогда как во всем мире их более 400 млн [2]. Эти организации имеют разную структуру, стремятся к достижению различных целей и решают определенные задачи, однако, всех их связывает выбранная стратегия управления, которая определяет их путь к успеху в конкурентной среде.

Так, Фредерик Лалу, бывший партнер консалтинговой компании McKinsey, в своей книге «Открывая организации будущего» (Reinventing Organizations, 2014) описал эволюцию организаций по аналогии с развитием человеческого сознания и разделил их на несколько этапов (парадигм), каждому из которых присвоил определенный цвет:

1. Красный – самый базовый и реактивный тип организации, зародившийся около 10 тысяч лет назад. Мир воспринимается как опасное место, где выживает сильнейший. Этому типу организации присуща авторитарность, жесткая вертикаль власти, четкое распределение обязанностей и коммуникация по принципу «сверху-вниз»,

2. Янтарный – возник около 4 000 лет до н.э. с появлением первых государств и бюрократии. Это реакция на хаос «красных» организаций — здесь главным становится порядок и стабильность. Модель бизнеса консервативная, конформистская, со стабильной иерархией.

3. Оранжевый – рожден в эпоху Просвещения и промышленной революции и ориентирован на достижение результата, инновации и конкуренцию. Это бизнес, построенный на соперничестве, где главными ценностями являются деньги и признание,

4. Зеленый – постмодернистский ответ на бездушную эффективность «оранжевых» машин. Фокус смещен на корпоративную культуру, достижение общей цели, гибкость, наличие ценностей и мотивацию сотрудников.

5. Бирюзовый – высшая на сегодня стадия эволюции по Лалу. Организация воспринимается не как механизм или семья, а как живая сущность со своей собственной целью, которая постоянно развивается [3].

Первые бирюзовые организации появились задолго до публикации книги Фредерика Лалу, а именно более 30 лет назад. Бирюзовые организации ставились в противовес традиционным, с жесткой иерархией. Сотрудники ориентировались на достижение целей и максимальную эффективность, а не на составление отчетов для высшего руководства. Основными принципами бирюзовой модели управления принято считать:

1. Открытые и понятные ценностные установки,
2. Децентрализация управления, максимальное сокращение центрального офиса,
3. Доверительные отношения вместо контроля,
4. Прозрачность и доступность информации,
5. Дробление обязанностей вместо отдельно взятой должности,
6. Налаженные механизмы обратной связи,
7. Возможность самоорганизации во временные группы и подобные структуры для решения задач и проведения экспериментов, поощрение новаторства.

Таким образом, в концепции бирюзовой организации высшей ценностью считается человек и доверительные взаимоотношения в команде. Именно эти и другие принципы заложены в основу гибкой методологии управления, что позволяет говорить о естественной базе для внедрения Agile в бирюзовую модель управления. В следующей главе рассматриваются ключевые идеи и принципы Agile, а также показывается как они логично дополняют и реализуют бирюзовую модель управления в ИТ-процессах.

Agile в управлении проектами, понятие самоорганизующихся процессов

Agile – итеративный (циклический) подход разработки проектов, способный к проявлению гибкости на всех этапах. При этом работа ведется в рамках коротких, фиксированных по времени, чаще 2-3 недели, циклов (спринтов), которые содержат фазы анализа, планирования, проектирования, разработки и выпуска.

В течение спринта команда проекта работает над созданием новой части продукта (инкремента). В конце каждой итерации результат демонстрируется заказчику, и в случае необходимости внесения каких-либо корректировок, они планируются и реализуются в ходе реализации следующей итерации [4]. Все это вкупе и обеспечивает гибкость, быструю обратную связь и готовность к изменениям.

На Рисунке 1 представлен основной принцип проектного управления по Agile.

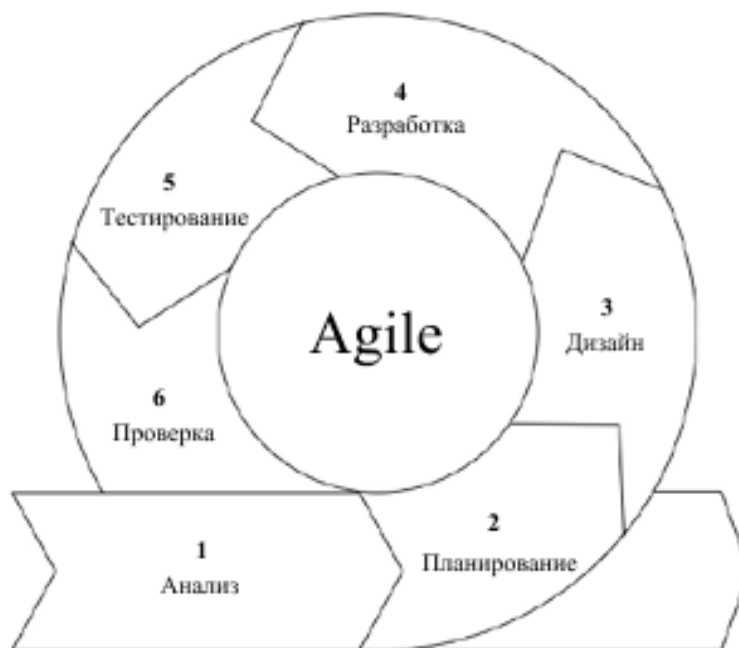


Рисунок 1 - Принцип проектного управления по Agile [5].

Agile базируется на четырех основных ценностях и двенадцати принципах, которые заложены в основу гибкого мышления.

Среди ценностей:

1. Люди и их взаимодействие важнее процессов и инструментов,
2. Работающий продукт важнее подробной документации,
3. Сотрудничество с заказчиком важнее формального контракта,
4. Готовность к изменениям важнее строгого плана.

Двенадцать принципов, раскрывающих и дополняющих основные ценности Agile:

1. Удовлетворяйте потребности заказчика путем ранней и непрерывной поставки ценного ПО.
2. Будьте готовы к изменению требований даже на поздних стадиях разработки.
3. Используйте изменения требований для конкурентного преимущества заказчика.
4. Выпускайте работающий продукт как можно чаще (от пары недель до пары месяцев).

5. Работайте вместе с заказчиком на протяжении всего проекта.
6. Привлекайте мотивированных профессионалов к работе.

Для плодотворной работы создайте необходимые условия, доверяйте и поддерживайте команду.

7. общайтесь с командой на всех этапах.
8. Главный показатель прогресса – работающий продукт.
9. Поддерживайте устойчивый ритм работы для инвесторов, разработчиков и пользователей. Agile помогает наладить такой устойчивый процесс разработки.
10. Уделяйте внимание техническому совершенству и качеству проектирования.
11. Минимизируйте лишнюю работу, ставьте простоту в приоритет.

12. Самые лучшие требования, архитектурные и технические решения рождаются у самоорганизующихся команд. Команда должна систематически анализировать возможные способы улучшения эффективности и соответственно корректировать стиль своей работы [4].

Важно подчеркнуть, что Agile – это не свод строгих правил, а своего рода «философия управления», которая объединяет несколько различных гибких методик разработки. Среди них есть как популярные, такие как Scrum и Kanban, так и более специализированные, но все они следуют ценностям Agile, попутно внося свои корректировки. По данным исследования «A Systematic Study on Agile Software Development Methodologies and Practices» [6] были выделены следующие практики:

1. Scrum – фреймворк для разработки, поставки и поддержки сложных продуктов. Он основан на эмпирическом подходе к управлению проектами, который признает, что в сложных ситуациях невозможно полностью спланировать и предсказать все возможные сценарии. Вместо этого Scrum использует итеративный и инкрементный процесс, который позволяет постоянно получать обратную связь от заказчика и улучшать продукт [7].

2. Kanban – метод управления задачами, который основан на визуализации рабочего процесса с помощью специальной доски. Основной целью Kanban является оптимизация потока задач и повышение прозрачности процессов [8].

3. Extreme Programming (eXtreme Programming, XP) – методология разработки ПО, которая оптимизирует процесс путем эффективного управления изменениями в коде.

4. Lean Software Development (LSD) – методология, унаследовавшая концепцию бережливого производства (Lean Manufacturing), адаптированная под создание программных продуктов. Lean предполагает оптимизацию рабочих процессов, активное вовлечение всех участников проекта и упрощение архитектуры продукта [9].

5. Crystal – одна из наиболее легковесных Agile-методологий, в основном за счет минимального ведения проектной документации. Crystal опирается на командное взаимодействие, отодвигая процессы и инструменты на второй план [10].

6. Feature-Driven Development (FDD) – методология, ориентированная на клиента, которая предполагает циклический (итеративный) и ступенчатый (инкрементальный) процесс разработки ПО [11].

Опираясь на вышеперечисленное, можем отметить определенную корреляцию между Agile и бирюзовой моделью управления. Оба подхода акцентируют внимание на самоорганизации, эффективности и открытости.

Реализация применения Agile в бирюзовой модели управления на практике

Современное проектное управление знает сравнительно небольшое количество примеров успешной интеграции Agile-подходов в бирюзовую модель управления, поскольку это является сложным управленческим вызовом, требующего от компании масштабной трансформации операционных и организационных процессов, а именно внедрения гибких инструментов разработки совместно с радикальным отказом от административного контроля в пользу самоорганизации.

В контексте российских компаний этот процесс дополнительно осложняется культурными особенностями, которые, согласно типологии Г. Хофстеде, характеризуются

высокой дистанцией власти (PDI, Power Distance Index) и стремлением к избеганию неопределенности (UAI, Uncertainty Avoidance Index) [12].

Тем не менее, некоторые сферы деятельности, отличающиеся активным использованием информационных технологий, становятся площадками преодоления подобных барьеров за счет своей открытости к экспериментам и стремлению к инновациям.

В качестве первой компании, наиболее близко подошедшей к успешной интеграции Agile-подходов в бирюзовую модель управления можно привести ООО «Банк Точка» (далее – «Точка»). В компании «Точка» используется холакратия – система управления компанией, в которой ответственность и полномочия за принятие решений распределяются между всеми ее сотрудниками, вместо управленческой иерархии [13].

Холакратия во многом схожа с бирюзовой моделью управления, поскольку оба подхода отвергают традиционную иерархию в пользу самоуправления, а также поощряют свободу действий и распределение ответственности внутри команды. Также, холакратия многое переняла у философии Agile, которая появилась в IT для ускорения разработки программ и быстрой адаптации к изменениям. Как и Agile-подход, холакратия построена на принципах гибкого управления, взаимодействия внутри команды и оперативной обратной связи.

Вместо традиционной иерархии, где сотрудники подчиняются руководителям, команда компании «Точка» использует структуру кругов, автономных групп, отделов, где участники сами принимают решения, распределяют задачи и несут ответственность за результат.

На Рисунке 2 представлена корпоративная система Holaspirit, которая демонстрирует организационную структуру компании.

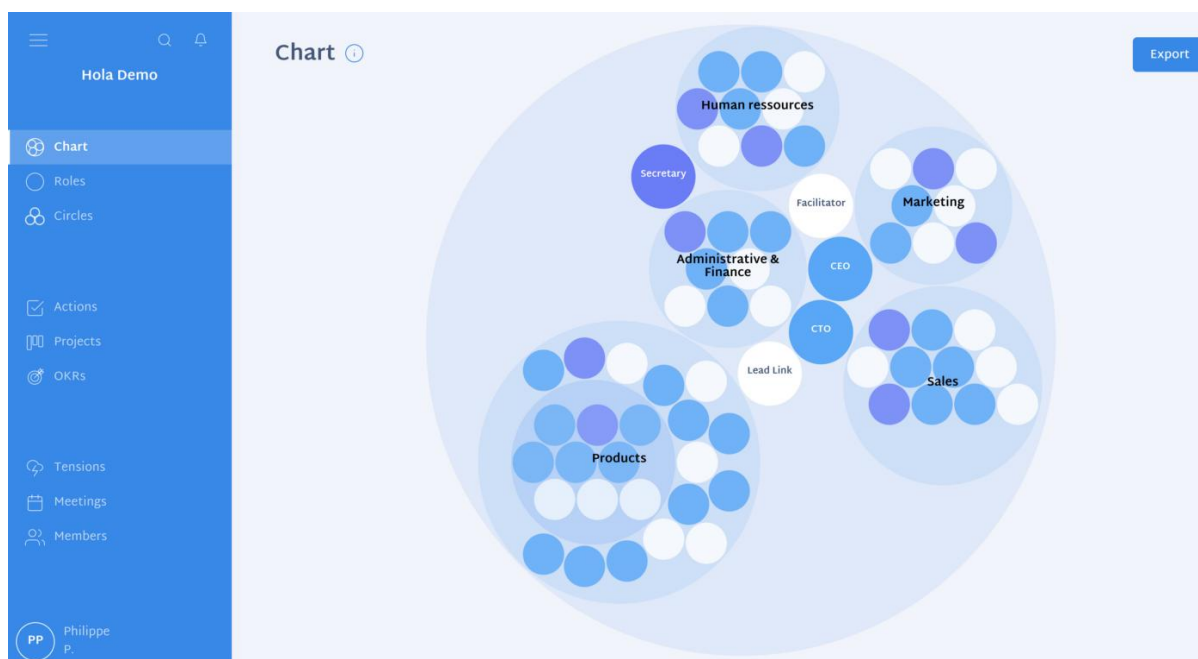


Рисунок 2 - Корпоративная система Holaspirit [14].

Компания демонстрирует стабильный рост и входит в десятку банков для малого и среднего бизнеса в России. В частности, анализ годовой отчетности компании за 2025 год, опубликованный на сайте Банка России, показал значительный рост чистой прибыли – 6,16 млрд руб. против 4,21 млрд руб. за аналогичный период прошлого года [15].

Другой компанией, успешно соответствующей принципам бирюзового управления с Agile-практиками в продуктовых и аналитических командах можно считать АО «ВкусВилл» (далее – «ВкусВилл»). В компании «ВкусВилл» отказались от традиционных должностных инструкций, приказов и распоряжений в пользу принципа договоренностей. Такой подход минимизирует бюрократию и позволяет оперативно решать задачи, общаясь напрямую с сотрудниками, которые в них задействованы. Благодаря этому «ВкусВилл» опережает конкурентов, использующих «традиционный» менеджмент [16].

Помимо этого, внутри компании активно пользуются двумя популярными Agile-методологиями, а именно Scrum для работы по спринтам и Kanban для управления проектами и визуализации рабочих процессов.

«ВкусВилл» показывает устойчивый рост и входит в топ-10 розничных сетей Москвы и Подмосковья. По итогам 2025 года выручка продуктового ритейлера выросла на 9,73% до 361 млрд руб. Темпы роста снизились почти вдвое по сравнению с 2024 годом (прирост 27%, выручка 329 млрд руб.) [17].

Еще одна компания, которая практически полностью соответствует заголовку данной статьи – основанная в 2006 году Йосом Де Блоком нидерландская Buurtzorg, которая совершила настоящую революцию в патронажном уходе и стала лидером здравоохранения страны.

Главный принцип управленческой модели Buurtzorg – «человечность превыше бюрократии», который реализуется в двух ключевых стратегиях: первая стратегия – это целостный и ориентированный на человека подход к сестринскому делу, основанный на отстаивании автономии и расширении прав и возможностей пациентов. Основные принципы включают непрерывность ухода, построение доверительных отношений, создание сетей в районе проживания и связь пациентов с общественными ресурсами. Вторая стратегия – создание независимых, самоуправляемых команд численностью до 10-12 медсестер, которые ответственны за 50-60 пациентов в заданном районе [18].

Компания следует ключевым ценностям и принципам Agile, таким как освобождение медицинского персонала от бумажной волокиты и фокус на социальных связях.

Также, в компании разработана и внедрена специальная цифровая платформа – Buurtzorgweb, где все данные по пациентам оцифрованы и введены в систему, что позволяет автоматизировать большую часть процессов. Платформа объединяет все команды и предоставляет доступ к единому сообществу. Вся информация на платформе полностью прозрачна, поэтому каждая команда может сравнивать свои результаты с результатами других команд.

Таким образом, Buurtzorgweb выступает не только в роли корпоративной базы данных, но и является специализированной социальной сетью и образовательным ресурсом для всех сотрудников [19].

С момента основания организация значительно выросла и теперь насчитывает более 10 000 медсестер и помощников, объединенных в 850 самоуправляемых районных команд [20].

Основываясь на примерах выше, можем отметить, что реорганизация традиционной иерархической системы и передача большей части рабочих процессов в руки линейных сотрудников не только повышает их лояльность, но и позволяет регулярно повышать экономические показатели компании.

Заключение

Проведенный в рамках статьи анализ позволяет сделать вывод, что принципы бирюзовых организаций (самоуправление, доверие, прозрачность и фокус на взаимоотношениях между людьми), естественным образом дополняют ценности и принципы проектного управления по Agile (люди и взаимодействие, готовность к изменениям и приоритезация работающего продукта).

Анализ практических примеров российских компаний («Точка», «ВкусВилл») и зарубежной Buurtzorg подтверждает, что подобная интеграция приводит к устойчивому экономическому росту, а также повышает доверие сотрудников и клиентов компании.

Таким образом, полученные в ходе исследования результаты подчеркивают, что успешное внедрение подобного подхода требует от компании преодоления ряда серьезных задач, таких как отказ от высокой дистанцированности власти, что особенно характерно для российских компаний, поэтапную трансформацию традиционной модели управления и заинтересованность со стороны руководства.

Список литературы

1. The 17th State of Agile Report [Электронный ресурс]. — URL: <https://info.digital.ai/rs/981-LQX-968/images/RE-SA-17th-Annual-State-Of-Agile-Report.pdf>
2. Численность МСП в России обновила исторический максимум и превысила 6,8 млн предприятий [Электронный ресурс]. — URL: https://economy.gov.ru/material/news/chislennost_msp_v_rossii_obnovila_istoricheskii_maximum_i_prevysila_68 mln_predpriyatiy.html
3. Открывая организации будущего / Фредерик Лалу ; пер. с англ. В. Кулябиной ; [науч. ред. Е. Голуб]. — М. : Манн, Иванов и Фербер, 2016. — 432 с. — с. 28-52
4. Fowler, M., & Highsmith, J. (2001). The agile manifesto. Software development, 9(8), 28-35.
5. Trivedi, D. Agile Methodologies. Int. J. Comput. Sci. Commun. 2021,12, 91–100.
6. Flora H.K., Chande S.V. A Systematic Study on Agile Software Development Methodologies and Practices // International Journal of Computer Science and Information Technologies. 2014. Т. 5. Рр. 3626–3637.
7. Шокальская, А. М. SCRUM-методика управления проектами / А. М. Шокальская. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2023. — № 42 (489). — С. 62-66. — URL: <https://moluch.ru/archive/489/106779>.
8. Шаврей А. Г. ПРИМЕНЕНИЕ ГИБКИХ МЕТОДОЛОГИЙ (AGILE, SCRUM, KANBAN) В ПРОДАКТ-МЕНЕДЖМЕНТЕ // Научный Лидер. 2024. №43 (193). URL: <https://scilead.ru/article/7248-primeneniye-gibkikh-metodologiy-agile-scrum-kanban>
9. Бобовникова А.О. Agile-стратегии в управлении ИТ-проектами и их вклад в формирование бизнес-стратегии на рынке США // Финансовый вестник. - 2023. - № 2 (61). - С. 85-89.
10. M. Mrsic, "Crystal Methods · Activecollab Blog", ActiveCollab, 2017. [Online]. Available: <https://activecollab.com/blog/project-management/crystal-methods>.
11. Zahid Nawaz, Shabib Aftab, Faiza Anwer, "Simplified FDD Process Model", International Journal of Modern Education and Computer Science(IJMECS), Vol.9, No.9, pp. 53-59, 2017.
12. Науменко Т.В., Морозова Д.А. Теория межкультурных измерений Г. Хофстеде как методологическая основа исследования современных социальных процессов // Международный журнал исследований культуры. – 2018. – № 1 (30). – с. 144–154.

13. Дементьева Александра Олеговна Холакратия, как подход в менеджменте // StudNet. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/holakratiya-kak-podhod-v-menedzhmente> (дата обращения: 24.04.2026).
14. Дарья Боровикова, банк «Точка»: Как построить холакратию в бизнесе [Электронный ресурс]. — URL: <https://setters.education/blog/articles/darya-borovikova-bank-tochka-kak-postroit-holakratiyu-v-biznese>
15. ООО "Банк Точка" – годовая отчетность за 2025 год | Банк России [Электронный ресурс]. — URL: https://cbr.ru/banking_sector/credit/coinfo/a2025/?regnum=3545
16. Дряев М.Р., Труханович Д.С. «Бирюзовое» управление или как работают организации будущего // Проблемы управления, экономики, политики и права в глобализирующемся мире (Ростов-на Дону, 15–20 апр. 2019 г.): сб. докладов Фестиваля науки ЮРИУ РАНХиГС / Ростов-на Дону: ЮРИУФ РАНХиГС. Ростов-на Дону, 2019. – с. 67–69.
17. Tadviser | ВкусВилл [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F:%D0%92%D0%BA%D1%83%D1%81%D0%92%D0%B8%D0%BB%D0%BB>
18. Алексей Ян. Уход на дому самоуправляющимися командами медсестер: модель голландской Buurtzorg. «Agile Consulting». [Электронный ресурс]. — URL: <https://onagile.ru/blog/buurtzorg/>
19. Патронажный уход Buurtzorg: голландский опыт малых команд [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.ru.dialog-health.com/healthcare-ru-buurtzorg>
20. Hegedüs A., Schürch A., Bischofberger I. Implementing Buurtzorg-derived models in the home care setting: a Scoping Review // International Journal of Nursing Studies Advances. 2022. Т. 4. С. 100061.

References

1. The 17th State of Agile Report [Elektronnyj resurs]. — URL: <https://info.digital.ai/rs/981-LQX-968/images/RE-SA-17th-Annual-State-Of-Agile-Report.pdf>
2. CHislennost' MSP v Rossii obnovila istoricheskij maksimum i prevysila 6,8 mln predpriyatij [Elektronnyj resurs]. — URL: https://economy.gov.ru/material/news/chislennost_msp_v_rossii_obnovila_istoricheskij_maximum_i_prevysila_68_mln_predpriyatij.html
3. Otkryvaya organizacii budushchego / Frederik Lalu ; per. s angl. V. Kulyabinoj ; [nauch. red. E. Golub]. — M. : Mann, Ivanov i Ferber, 2016. — 432 s. — pp. 28-52
4. Fowler, M., & Highsmith, J. (2001). The agile manifesto. Software development, 9(8), pp.28-35.
5. Trivedi, D. Agile Methodologies. Int. J. Comput. Sci. Commun. 2021,12, pp. 91–100.
6. Flora H.K., Chande S.V. A Systematic Study on Agile Software Development Methodologies and Practices // International Journal of Computer Science and Information Technologies. 2014. Т. 5. pp. 3626–3637.
7. SHokal'skaya, A. M. SCRUM-metodika upravleniya proektami / A. M. SHokal'skaya. — Tekst: neposredstvennyj // Molodoj uchenyj. — 2023. — № 42 (489). — pp. 62-66. — URL: <https://moluch.ru/archive/489/106779>.

8. SHavrej A. G. PRIMENENIE GIBKIH METODOLOGIJ (AGILE, SCRUM, KANBAN) V PRODAKT-MENEDZHMENTE // Nauchnyj Lider. 2024. №43 (193). URL: <https://scilead.ru/article/7248-primeneniye-gibkikh-metodologiy-agile-scrum-ka>
 9. Bobovnikova A.O. Agile-strategii v upravlenii IT-proektami i ih vklad v formirovaniye biznes-strategii na rynke SSHA // Finansovyj vestnik. - 2023. - № 2 (61). - pp. 85-89.
 10. M. Masic, "Crystal Methods · Activecollab Blog", ActiveCollab, 2017. [Online]. Available: <https://activecollab.com/blog/project-management/crystal-methods>.
 11. Zahid Nawaz, Shabib Aftab, Faiza Anwer, "Simplified FDD Process Model", International Journal of Modern Education and Computer Science(IJMECS), Vol.9, No.9, pp. 53-59, 2017.
 12. Naumenko T.V., Morozova D.A. Teoriya mezhkul'turnyh izmerenij G. Hofstede kak metodologicheskaya osnova issledovaniya sovremennyh social'nyh processov // Mezhdunarodnyj zhurnal issledovaniy kul'tury. – 2018. – № 1 (30). – pp. 144–154.
 13. Dement'eva Aleksandra Olegovna Holakratiya, kak podhod v menedzhmente // StudNet. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/holakratiya-kak-podhod-v-menedzhmente> (data obrashcheniya: 24.04.2026).
 14. Dar'ya Borovikova, bank «Tochka»: Kak postroit' holakratiyu v biznese [Elektronnyj resurs]. — URL: <https://setters.education/blog/articles/darya-borovikova-bank-tochka-kak-postroit-holakratiyu-v-biznese>
 15. ООО "Bank Tochka" – godovaya otchetnost' za 2025 god | Bank Rossii [Elektronnyj resurs]. — URL: https://cbr.ru/banking_sector/credit/coinfo/a2025/?regnum=3545
 16. Dryaev M.R., Truhanovich D.S. «Biryuzovoe» upravlenie ili kak rabotayut organizatsii budushchego // Problemy upravleniya, ekonomiki, politiki i prava v globaliziruyushchemsya mire (Rostov-na Donu, 15–20 apr. 2019 g.): sb. dokladov Festivalya nauki YURIU RANHiGS / Rostov-na Donu: YURIUF RANHiGS. Rostov-na Donu, 2019. – pp. 67–69.
 17. TAdviser | VkusVill [Elektronnyj resurs]. — URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F:%D0%92%D0%BA%D1%83%D1%81%D0%92%D0%B8%D0%BB%D0%BB>
 18. Aleksej YAn. Uhod na domu samoupravlyayushchimisya komandami medsester: model' gollandskoj Buurtzorg. «Agile Consulting». [Elektronnyj resurs]. — URL: <https://onagile.ru/blog/buurtzorg/>
 19. Patronazhnyj uhod Buurtzorg: gollandskij opyt malyh komand [Elektronnyj resurs]. — URL: <https://www.ru.dialog-health.com/healthcare-ru-buurtzorg>
 20. Hegedüs A., Schürch A., Bischofberger I. Implementing Buurtzorg-derived models in the home care setting: a Scoping Review // International Journal of Nursing Studies Advances. 2022. T. 4. pp. 100061.
-



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.65:004.624

ОРГАНИЗАЦИЯ STAGING СЛОЯ В СУБД GREENPLUM, УСТОЙЧИВОГО К ЭВОЛЮЦИИ СХЕМЫ ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ, В ФРЕЙМВОРКЕ BI.QUBE

¹ Ибишов Т.С., ² Коростелев Д.А.

ФГБОУ ВО "БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ", Брянск, Россия (241035, Брянская область, город Брянск, б-р 50 лет Октября, д. 7), e-mail: ¹ibishov.tural20@mail.ru, ²nigm85@mail.ru

Статья посвящена проектированию staging слоя в СУБД Greenplum с использованием фреймворка BI.QUBE. Особое внимание уделено проблеме изменяемости метаданных источников данных и необходимости сохранения стабильности объектов базы данных при эволюции схемы. Предлагается подход к организации многоуровневая структура staging-слоя в фреймворке BI.Qube, обеспечивающая версионирование метаданных и контролируемое объединение различных версий данных без пересоздания объектов. Предложенный подход позволяет автоматизировать, повысить устойчивость ETL-процессов и обеспечить управляемую эволюцию структуры данных.

Ключевые слова: Хранилище данных, озеро данных, staging слой, ETL-процесс, parquet файлы, внешние таблицы.

ORGANIZING A STAGING LAYER IN A GREENPLUM DBMS, RESILIENT TO DATA SOURCE SCHEMA EVOLUTION, USING THE BI.QUBE FRAMEWORK

¹ Ibishov T.S., ² Korostelev D.A.

BRYANSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY, Bryansk, Russia (241035, Bryansk region, Bryansk, 50 let Oktyabrya blvd., 7), e-mail: ¹ibishov.tural20@mail.ru, ²nigm85@mail.ru

This article discusses the design of a staging layer in a Greenplum DBMS using the BI.QUBE framework. Particular attention is paid to the issue of data source metadata mutability and the need to maintain database object stability during schema evolution. We propose an approach to organizing a multi-level staging layer structure in the BI.Qube framework, enabling metadata versioning and controlled merging of different data versions without recreating objects. The proposed approach enables automation and increased resilience of ETL processes and ensures controlled evolution of the data structure.

Keywords: Data warehouse, data lake, staging layer, ETL process, parquet files, external tables.

Корпоративное хранилище [2] данных представляет собой централизованную систему хранения и обработки информации, предназначенную для аналитических задач и поддержки принятия управленческих решений. В отличие от баз данных, ориентированных на транзакционные нагрузки, хранилище данных формируется как интеграционная среда, объединяющая данные из разнородных источников и обеспечивающая их историчность, согласованность и пригодность для аналитической обработки.

В архитектуре хранилищ данных традиционно выделяют несколько логических слоёв [1]. Наиболее распространённой является модель, включающая staging слой [7], интеграционный (core) слой и слой представления (presentation). Такое разделение позволяет

разграничить ответственность между этапами загрузки, преобразования и потребления данных.

Staging слой выполняет роль промежуточной области хранения. На данном этапе данные поступают из источников в максимально приближённом к исходному виду и готовятся к последующей обработке.

В современных архитектурах staging слой всё чаще реализуется с использованием объектных хранилищ (data lake) и распределённых аналитических СУБД. Такой подход позволяет отделить хранение данных от их вычислительной обработки и обеспечить масштабируемость при росте объёмов информации.

В рассматриваемой работе staging слой реализуется в среде Greenplum – распределённой аналитической СУБД класса MPP (Massively Parallel Processing) [6], предназначенной для обработки больших объёмов данных в параллельном режиме. Greenplum построена по сегментной архитектуре, в которой данные распределяются между вычислительными узлами кластера, что обеспечивает горизонтальное масштабирование и высокую производительность аналитических запросов.

Для организации хранения данных используется объектное хранилище S3, а данные сохраняются в формате parquet – колоночном файловом формате, оптимизированном для аналитических нагрузок. Доступ к данным в Greenplum осуществляется через механизм внешних таблиц, позволяющий выполнять запросы к данным, физически расположенным вне базы.

Подобная архитектура обеспечивает гибкость и масштабируемость, однако при эксплуатации staging слоя возникает проблема эволюции схемы источников данных. В условиях, когда структура входящих данных изменяется во времени, необходимо обеспечить поддержку таких изменений без нарушения стабильности объектов базы данных и зависимых слоёв хранилища.

Проблема эволюции схемы источников данных

На практике структура данных источников редко остаётся неизменной. Особенно это характерно для потоковых систем, интеграционных сервисов и микросервисных архитектур, где модель данных развивается вместе с бизнес-логикой. Под эволюцией схемы источника понимается изменение набора атрибутов и их характеристик во времени. Такие изменения могут выражаться в:

- добавлении новых атрибутов;
- удалении существующих атрибутов;
- изменении типа данных атрибута;

Staging слой, принимающий данные из источников, должен обеспечивать стабильность интерфейса для последующих слоёв (Core, Presentation).

Если структура источника изменяется, а staging объекты жёстко соответствуют предыдущей версии схемы, возможны следующие негативные последствия:

1. *Сбой ETL-процесса* – при появлении нового поля или изменении типа загрузка может завершиться ошибкой.
2. *Нарушение зависимостей* – необходимость изменения или пересоздания внешних таблиц приводит к нарушению ссылок в представлениях и процедурах.

3. *Потеря исторической согласованности* – изменения схемы могут привести к некорректной интерпретации ранее загруженных данных.

4. *Рост эксплуатационных затрат* – каждое изменение требует ручного вмешательства разработчика.

Staging слой должен быть спроектирован таким образом, чтобы изменения метаданных источника не приводили к отказу ETL-процессов и не требовали пересоздания существующих объектов базы данных.

В рамках фреймворка BI.Qube [3] данная задача решается путём автоматизированного версионирования схемы и формирования многоуровневой структуры staging объектов, что позволяет изолировать изменения и сохранить целостность архитектуры.

Для решения данной задачи предлагается четырёхуровневая архитектура staging слоя (Рисунок 1).

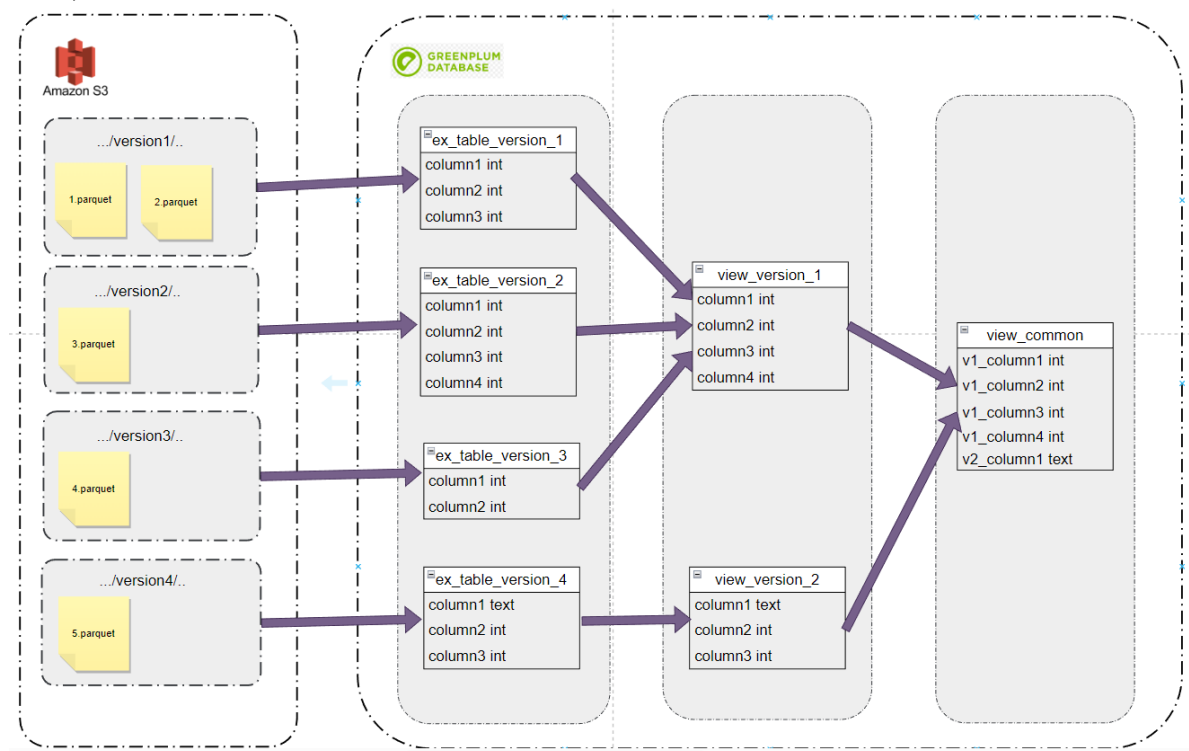


Рисунок 1 - Четырёхуровневая архитектура staging слоя.

Рассмотрим каждый уровень подробнее.

Уровень 1 – версионированное хранение в S3

На первом уровне данные размещаются в объектном хранилище S3 в формате parquet. Файлы группируются по каталогам таким образом, что каждая директория соответствует определённой версии метаданных источника. Версия схемы включается в путь каталога.

Принцип организации следующий:

- файлы с идентичной структурой атрибутов размещаются в одной папке;
- при появлении данных с новой схемой создаётся новая папка;

Физический уровень хранения обеспечивает изоляцию версий и сохраняет историческую структуру данных.

Уровень 2 – фиксирование версий в СУБД Greenplum

Для каждой папки в S3 автоматически создаётся отдельная внешняя таблица в Greenplum. Если существует две версии схемы, в S3 присутствуют две директории, а в Greenplum – две соответствующие внешние таблицы. Каждая таблица строго соответствует структуре файлов parquet конкретной версии.

Второй уровень гарантирует неизменность метаданных для каждой конкретной версии.

Уровень 3 – объединяющие представления без изменения типов

Третий уровень представляет собой первый этап логической консолидации. На этом уровне создаются представления, объединяющие внешние таблицы, которые:

- имеют совпадающие типы данных для одноимённых колонок;
- могут отличаться набором атрибутов.

Рассмотрим пример. Допустим, в результате нескольких итераций трансфера данных из систем источников в staging слой хранилища, на втором уровне staging слоя получили четыре 4 разных схем метаданных для одной таблицы (Рисунок 2)

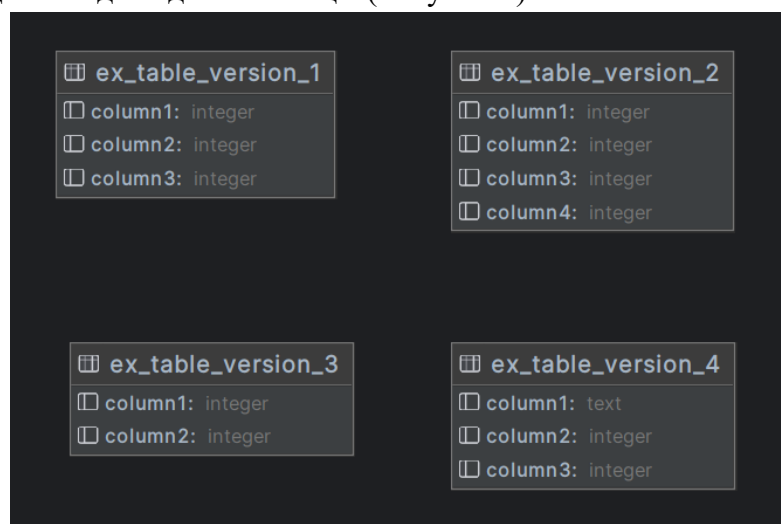


Рисунок 2 - Внешние таблицы первого уровня staging слоя.

Для объединения таблиц с разными схемами, потребуется создания двух представлений. Таблицы с версиями 1 – 3 можно собрать в одно представление, так как отсутствуют конфликты в названиях атрибутов, имеющих разные типы (Рисунок 3). Для 4 версии метаданных потребуется отдельное представление (Рисунок 4).


```
create or replace view staging_layer.view_level_1_version_1 as
select
    column1,
    column2,
    column3,
    null::int as column4
from staging_layer.ex_table_version_1
union all
select
    column1 column1,
    column2 column2,
    null::int as column3,
    column4 column4
from staging_layer.ex_table_version_2
union all
select
    column1 column1,
    column2 column2,
    null::int as column3,
    null::int as column4
from staging_layer.ex_table_version_3;
```

Рисунок 3 - DDL скрипт создания представления для объединения версий метаданных 1-3.

```
create or replace view staging_layer.view_level_1_version_2 as
select
    column1,
    column2,
    column3
from staging_layer.ex_table_version_4;
```

Рисунок 4. DDL скрипт создания представления для объединения версий метаданных 4.

Третий уровень гарантирует стабильность типов данных внутри представления.

Уровень 4 – общее представление

Четвёртый уровень предназначен для формирования единой точки доступа ко всем данным независимо от версии схемы.

На этом этапе необходимо определить стратегию обработки колонок с одинаковым названием, но различными типами. В рамках фреймворка BI.Qube поддерживаются две конфигурационные модели.

Возможны два режима:

1. *Приведение типов к единому формату*, заданному в метаданных (Рисунок 5).
2. *Добавление к наименованию атрибутов номера версии*, при котором в итоговом представлении сохраняются обе версии атрибута, но с разными версиями (Рисунок 6).

```
create or replace view staging_layer.common_view as
select
    column1::text,
    column2,
    column3,
    column4
from staging_layer.view_level_1_version_1
union all
select
    text column1,
    column2 column2,
    column3 column3,
    null::int as column4
from staging_layer.view_level_1_version_2;
```

Рисунок 5 - Создание общего представление с приведением типов конфликтующих колонок.

```
create or replace view staging_layer.common_view as
select
    column1 as v1_column1,
    column2 as v1_column2,
    column3 as v1_column3,
    column4 as v1_column4,
    null::text as v2_column1
from staging_layer.view_level_1_version_1
union all
select
    null::int as v1_column1,
    column2 as v1_column1,
    column3 as v1_column1,
    null::int as v1_column1,
    column1 as v2_column1
from staging_layer.view_level_1_version_2;
```

Рисунок 6 - Создание общего представление с добавлением номера версии к наименованию колонок.

Выбор режима определяется настройками пользователя и требованиями к согласованности данных.

Выводы

Предложенная структура обеспечивает следующие характеристики:

1. Ни один объект не удаляется и не пересоздаётся.
2. Каждая версия схемы физически изолирована.
3. Изменения структуры источника не приводят к сбою ETL-процесса.
4. Появляется возможность анализа эволюции схемы по уровням.
5. Пользователь может самостоятельно выбирать уровень абстракции.

Выбор уровня зависит от требований:

- ссылка на второй уровень гарантирует неизменность конкретной версии схемы;
- ссылка на третий уровень гарантирует стабильность типов данных;
- ссылка на четвёртый уровень предоставляет унифицированный доступ ко всем данным.

Предложенная архитектура staging слоя в СУБД Greenplum обеспечивает контролируемую эволюцию схемы данных в условиях, изменяемых метаданных источников. Использование версионирования хранения, изоляции внешних таблиц и системы представлений позволяет исключить пересоздание объектов и сохранить стабильность зависимых слоёв. Применение объектного хранилища S3 обеспечивает масштабируемость и эффективность хранения, что делает предложенный подход применимым для построения современных распределённых хранилищ данных.

Ключевым практическим преимуществом решения является возможность его автоматизации. Процесс создания новых версий staging объектов может полностью управляться метаданными в рамках фреймворка BI.Qube. При появлении новой версии схемы автоматически формируются:

- новая директория в S3;
- соответствующая внешняя таблица;
- необходимые представления третьего и четвёртого уровней.

При этом в наиболее распространённом сценарии – когда структура метаданных не изменилась – вмешательство в базу данных не требуется вовсе. Достаточно загрузить новый parquet файл в соответствующую версионированную директорию S3. Поскольку внешняя таблица уже настроена на чтение из данной папки, данные становятся доступными автоматически, без изменения DDL-объектов и без перезапуска ETL-процесса.

Staging слой перестаёт быть точкой хрупкости архитектуры и превращается в устойчивый, масштабируемый механизм приёма данных, поддерживающий как стабильные, так и эволюционирующие схемы источников.

Список литературы

1. Талия Д., Трунфио П. Большие данные.: Современные фреймворки и разработка приложений / Д. Талия, П. Трунфио, Ф. Мароццо, Л. Белькастро, Р. Кантини, А. Орсино - М: ДМКПресс, 2025. - 272 с.
2. Современные подходы и методы построения аналитических информационных систем / [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://bis.ru/pr/pub_detail.php?ID=2981.

3. Фреймворк BI.Qube 2.0 / [Электронный ресурс] – Режим доступа:
<https://biqube.ru/products/framework-biqube/>
4. Inmon W.H. Building the Data Warehouse. 5th Edition. - Wiley, 2020. - p. 576
5. Kimball R., Ross M. The Data Warehouse ETL Toolkit. - Wiley, 2013. - p.600
6. Проценков А. А. Оптимизация запросов при применении
методологии Data Vault для построения хранилищ данных в СУБД Postgresql и Greenplum //
Парадигма. –2025.–№5
7. Проценков А. А. Организация построения хранилищ данных с
использованием фреймворка BI.QUBE // Парадигма. –2025.–№5.

References

1. Talia D., Trunfio P. Big Data: Modern Frameworks and Application Development / D. Talia,
P. Trunfio, F. Marozzo, L. Belcastro, R. Cantini, A. Orsino - Moscow: DMKPress, 2025. -
p.272
 2. Modern Approaches and Methods for Building Analytical Information Systems / [Electronic
resource] - Access mode: https://bis.ru/pr/pub_detail.php?ID=2981.
 3. BI.Qube 2.0 Framework / [Electronic resource] - Access mode:
<https://biqube.ru/products/framework-biqube/>
 4. Inmon W.H. Building the Data Warehouse. 5th Edition. - Wiley, 2020. - p.576
 5. Kimball R., Ross M. The Data Warehouse ETL Toolkit. - Wiley, 2013. - p.600
 6. Proshchenkov A. A. Query Optimization Using Data Vault Methodology for Building Data
Warehouses in Postgresql and Greenplum DBMSs // Paradigm. - 2025. - №5.
 7. Proshchenkov A. A. Organizing the Construction of Data Warehouses Using the BI.QUBE
Framework // Paradigm. - 2025. - №5.
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала: <http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.056.53:004.62:004.7.056

КОРРЕЛЯЦИЯ СЕТЕВОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ И ЖУРНАЛОВ СОБЫТИЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА В АСУ ТП

¹Колдаев Т.А., ²Евдошенко О.И. (научный руководитель)

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ФГБОУ ВО "МОСКОВСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ", Москва, Россия,
(111024, город Москва, Авиамоторная ул., д.8а), e-mail: ¹tyfa1488@mail.ru,
²o.i.evdoshenko@mtuci.ru

В статье рассматривается применение корреляции сетевой телеметрии и журналов событий для обнаружения несанкционированного доступа в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Обосновывается необходимость пассивного мониторинга в АСУ ТП, где приоритетом являются непрерывность и безопасность технологического процесса. Раскрываются основные источники данных, используемые для выявления инцидентов, а также показываются преимущества совместного анализа сетевых и прикладных событий для повышения точности обнаружения подозрительной активности.

Ключевые слова: АСУ ТП, несанкционированный доступ, сетевая телеметрия, журналы событий, корреляция событий, информационная безопасность, промышленная кибербезопасность, пассивный мониторинг.

CORRELATION OF NETWORK TELEMETRY AND EVENT LOGS TO DETECT UNAUTHORIZED ACCESS TO AN APCS

¹Koldaev T.A., ²Evdoshenko O.I. (Academic Supervisor)

OF THE ORDER OF THE RED BANNER OF LABOR OF THE MOSCOW TECHNICAL
UNIVERSITY OF COMMUNICATIONS AND INFORMATICS, Moscow, Russia, (111024, Moscow,
Aviamotornaya str., 8a), e-mail: ¹tyfa1488@mail.ru, ²o.i.evdoshenko@mtuci.ru

This article examines the use of correlation between network telemetry and event logs to detect unauthorized access to automated process control systems. It also substantiates the need for passive monitoring in APCS, where process continuity and safety are a priority. The article discusses the primary data sources used to detect incidents and demonstrates the benefits of jointly analyzing network and application events to improve the accuracy of suspicious activity detection.

Keywords: Unauthorized access, network telemetry, event logs, event correlation, information security, industrial cybersecurity, passive monitoring.

Введение

В условиях цифровизации промышленности и расширения интеграции производственных сетей с корпоративной ИТ-инфраструктурой проблема обеспечения безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами приобретает особую значимость. Современные АСУ ТП уже не являются полностью изолированными контурами: в их состав входят операторские станции, серверы SCADA, программируемые логические контроллеры, инженерные рабочие места, средства удалённого обслуживания и каналы обмена с внешними системами. Это повышает эффективность

управления производством, однако одновременно увеличивает поверхность атаки и создаёт дополнительные возможности для несанкционированного доступа.

Особенность защиты АСУ ТП заключается в том, что приоритетом здесь выступает не только сохранность информации, но прежде всего непрерывность и безопасность самого технологического процесса. По этой причине применение активных средств контроля и агрессивных методов проверки в промышленной среде часто ограничено. В таких условиях особую практическую ценность приобретают пассивные методы мониторинга, основанные на анализе сетевой телеметрии и журналов событий, формируемых технологическими и инфраструктурными компонентами.

Отдельное использование каждого из указанных источников данных не всегда позволяет достоверно выявить признаки нарушения. Сетевая телеметрия показывает структуру и интенсивность взаимодействий между узлами, но не всегда раскрывает прикладной контекст действий. Журналы событий, напротив, фиксируют операции пользователей, изменения конфигурации и реакции систем, однако без сетевого контекста могут не давать целостной картины происходящего. В связи с этим всё более актуальным становится подход, основанный на корреляции сетевой телеметрии и журналов событий, позволяющий связать разрозненные признаки в единый инцидент и повысить точность обнаружения несанкционированного доступа.

Целью статьи является рассмотрение возможностей такого подхода применительно к АСУ ТП, а также обоснование его практической значимости для повышения эффективности мониторинга безопасности в промышленной среде.

Основная часть

В современных условиях автоматизированные системы управления технологическими процессами всё чаще функционируют не как изолированные локальные контуры, а как часть более широкой цифровой инфраструктуры предприятия. В состав АСУ ТП входят программируемые логические контроллеры, SCADA-серверы, операторские станции, инженерные рабочие места, средства удалённого доступа и сетевые устройства, обеспечивающие обмен данными между уровнями технологической и корпоративной среды. Такое устройство повышает управляемость производством, но одновременно создаёт дополнительные точки входа для нарушителя. В результате задача обнаружения несанкционированного доступа становится неотъемлемой частью обеспечения устойчивой и безопасной работы промышленного объекта.

Для АСУ ТП особенно важно, что последствия несанкционированного доступа могут проявляться не только в компрометации информации, но и в непосредственном нарушении технологического процесса. В отличие от традиционных информационных систем, где основной акцент делается на защите конфиденциальности данных, в промышленной среде на первый план выходят доступность, целостность управляющих воздействий и предсказуемость функционирования оборудования. Именно поэтому средства выявления подозрительной активности должны быть максимально осторожными и не создавать дополнительной нагрузки на технологический сегмент. Наиболее приемлемым подходом в таких условиях становится пассивный мониторинг, основанный на сборе и анализе уже существующих источников информации: сетевой телеметрии и журналов событий [1].

Сетевая телеметрия позволяет получить представление о том, какие узлы взаимодействуют между собой, какова интенсивность обмена, какие протоколы используются и не появляются ли в сети нетипичные соединения. Для промышленной среды это особенно ценно, поскольку многие процессы коммуникации носят повторяющийся и предсказуемый характер. Если в нормальном режиме инженерная станция обращается к контроллеру только в определённое время или по ограниченному набору сервисов, то любое отклонение от такого шаблона может рассматриваться как потенциальный индикатор несанкционированной активности. Телеметрия, получаемая через SPAN/TAP и NetFlow/IPFIX, позволяет выявлять новые направления трафика, всплески соединений, попытки сканирования и нетипичную сетевую активность без вмешательства в работу самих устройств АСУ ТП. Такой подход заложен и в логике дипломной работы, где в качестве основных источников данных рассматриваются именно пассивный захват трафика, журналы ПЛК/SCADA и потоковые метаданные соединений.

Однако только сетевой телеметрии для достоверного вывода о наличии несанкционированного доступа часто оказывается недостаточно. Она показывает сам факт связи, её интенсивность и направление, но далеко не всегда позволяет понять смысл действия. Например, соединение инженерной станции с контроллером может быть как частью регламентных работ, так и признаком подготовки к несанкционированному изменению конфигурации. Именно поэтому большое значение имеют журналы событий, формируемые SCADA-серверами, инженерными рабочими местами, системами удалённого доступа и средствами аутентификации. Такие журналы позволяют установить, кто выполнил вход в систему, с какого узла, в какое время, были ли изменены параметры, инициированы команды записи, произведена загрузка проекта или подтверждены тревожные сообщения [2].

Наибольший эффект достигается в том случае, когда эти два типа данных анализируются совместно. Корреляция сетевой телеметрии и журналов событий позволяет не рассматривать признаки изолированно, а выстраивать их в связанную последовательность. Например, если сначала в журнале VPN фиксируется вход пользователя вне регламентного окна, затем по данным сетевой телеметрии наблюдается новое соединение инженерной станции с ПЛК, а после этого в журнале инженерного ПО отражается изменение конфигурации, то совокупность таких событий даёт гораздо более надёжное основание говорить о возможном несанкционированном доступе, чем любой из этих признаков по отдельности. Такой подход позволяет уменьшить число ложных срабатываний и одновременно повысить вероятность раннего обнаружения реальной угрозы. Аналогичная логика корреляции источников и построения инцидента как цепочки взаимосвязанных событий рассматривается в проектируемом модуле обнаружения в вашей работе.

Для практического применения важно понимать, какие именно источники данных дают наибольшую ценность в задаче выявления несанкционированного доступа. Это можно представить в виде Таблицы 1.

Таблица 1 – Основные источники данных для обнаружения несанкционированного доступа в АСУ ТП

Источник данных	Что позволяет выявить	Преимущества	Ограничения
SPAN/TAP (копия сетевого трафика)	Нетипичные соединения, команды записи, обращения к промышленным протоколам	Высокая детализация, пассивность, доказательность	Требует ресурсов для анализа, возможны потери при неправильной настройке
NetFlow/IPFIX	Новые направления обмена, всплески активности, признаки сканирования	Масштабируемость, небольшой объём хранения, удобство анализа сетевой картины	Не показывает содержимое команд и прикладной смысл действий
Журналы SCADA/HMI	Входы пользователей, изменения параметров, подтверждение тревог, действия операторов	Даёт прикладной и технологический контекст	Зависит от полноты и корректности настроек аудита
Журналы инженерных станций и средств удалённого доступа	Запуск инженерных утилит, удалённые подключения, изменение конфигурации	Помогает установить субъект действия и временную последовательность	Источники разнородны, требуется нормализация данных

Как видно из Таблицы 1, каждый источник даёт только часть картины. Полноценное выявление несанкционированного доступа становится возможным именно при их совместном использовании. Сетевые данные фиксируют саму структуру взаимодействия, журналы раскрывают прикладной контекст, а их корреляция позволяет связать действие, объект воздействия и временную последовательность событий.

Отдельного внимания заслуживает вопрос формирования базовой модели нормального поведения. В промышленной сети значительная часть обмена носит повторяемый характер: известны типовые связи между ПЛК, SCADA-серверами, HMI-станциями и инженерными рабочими местами, временные интервалы обслуживания, частота обращения к определённым узлам и набор допустимых операций. На этом основании можно построить профиль нормальной активности и затем фиксировать отклонения от него. Если, например, в ночное время появляется нетипичный удалённый вход, либо инженерная станция начинает обращаться к контроллеру, с которым ранее не взаимодействовала, это может служить поводом для дополнительной проверки. При этом сами по себе отклонения ещё не означают инцидент, но становятся значимыми при подтверждении другими событиями из журналов или протокольных данных [3].

С практической точки зрения особенно важна объяснимость результатов обнаружения. Для промышленного персонала недостаточно получить общее уведомление о наличии «аномалии». Необходимо понимать, какой именно узел участвовал во взаимодействии, какой пользователь выполнил действие, какой протокол был задействован и почему система сочла это поведение подозрительным. Именно поэтому для АСУ ТП наиболее перспективны не исключительно сложные математические модели, а комбинированный подход, включающий прозрачные правила базовой гигиены, профили нормальной активности и корреляцию нескольких источников данных. Такой подход позволяет формировать оповещения, понятные как специалистам по информационной безопасности, так и эксплуатационному персоналу.

Таким образом, корреляция сетевой телеметрии и журналов событий представляет собой практически значимый и обоснованный подход к обнаружению несанкционированного доступа в АСУ ТП. Его применение позволяет повысить точность выявления подозрительной активности, сократить количество ложных срабатываний и сформировать более полное представление о происходящих событиях в технологической сети. Кроме того, данный подход соответствует специфике промышленной среды, поскольку реализуется на основе пассивного наблюдения и не требует активного вмешательства в контур управления.

Заключение

В ходе рассмотрения проблемы обнаружения несанкционированного доступа в АСУ ТП было установлено, что в современных условиях роста связности производственных и корпоративных сетей применение только одного источника наблюдения уже не обеспечивает достаточной полноты и достоверности контроля. Сетевая телеметрия позволяет выявлять нетипичные взаимодействия между узлами, новые направления обмена, всплески активности и признаки сканирования, тогда как журналы событий раскрывают прикладной контекст действий, фиксируют операции пользователей, изменения конфигурации и особенности работы технологических компонентов.

Проведённый анализ показал, что наибольшую практическую эффективность даёт именно корреляция этих источников данных. Совместное рассмотрение сетевых и журнальных событий позволяет перейти от фиксации отдельных признаков к построению целостной картины инцидента, в которой учитываются субъект действия, временная последовательность событий, характер обращения к технологическим узлам и контекст работы системы. Такой подход особенно важен для АСУ ТП, где необходимо не только своевременно выявлять подозрительную активность, но и минимизировать число ложных срабатываний, способных затруднить эксплуатацию или снизить доверие к средствам мониторинга.

Также можно сделать вывод о том, что для промышленной среды наиболее целесообразны пассивные методы мониторинга, не оказывающие негативного влияния на непрерывность технологического процесса. Использование сетевой телеметрии, журналов SCADA, инженерных станций и средств удалённого доступа позволяет организовать обнаружение несанкционированного доступа без активного вмешательства в работу оборудования. При этом особую ценность представляет сочетание правил базовой гигиены, профилей нормального поведения и механизмов корреляции событий.

Таким образом, корреляция сетевой телеметрии и журналов событий может рассматриваться как эффективное направление повышения уровня безопасности АСУ ТП. Её

применение способствует более точному выявлению инцидентов, повышению обоснованности оповещений и улучшению качества мониторинга в условиях промышленной эксплуатации. Перспективы дальнейшего развития данного подхода связаны с совершенствованием методов нормализации данных, адаптацией поведенческих профилей к изменениям технологического режима и расширением возможностей интеграции с системами централизованного журналирования и реагирования на инциденты.

Список литературы

1. Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». Официальное опубликование.
2. Приказ ФСТЭК России от 25 декабря 2017 г. № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». Официальный сайт ФСТЭК России.
3. Приказ ФСТЭК России от 14 марта 2014 г. № 31 «Об утверждении Требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды». Официальный сайт ФСТЭК России.
4. Stouffer K. A., Pease M., Tang C., Zimmerman T. NIST SP 800-82 Rev. 3. Guide to Operational Technology (OT) Security. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2023.
5. National Institute of Standards and Technology. NIST Publishes SP 800-82, Revision 3. 2023.
6. MITRE. ATT&CK for ICS: матрица тактик и техник для промышленных систем управления. Официальный ресурс MITRE ATT&CK.
7. MITRE. ATT&CK for ICS: Design and Philosophy. 2020.
8. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA). Securing Industrial Control Systems Fact Sheet. 2020.
9. CISA, U.S. Department of Energy. Cybersecurity Best Practices for Industrial Control Systems.
10. International Electrotechnical Commission. IEC 62443 — серия стандартов по безопасности промышленных систем автоматизации и управления. Официальная информация IEC.
11. International Electrotechnical Commission. IEC 62443-2-1:2024. Security for industrial automation and control systems — requirements for IACS security program.
12. International Electrotechnical Commission. IEC 62443-4-1:2018. Security for industrial automation and control systems — secure product development lifecycle requirements.
13. International Electrotechnical Commission. IEC 62443-4-2:2019. Security for industrial automation and control systems — technical security requirements for IACS components.
14. IEC. Understanding IEC 62443. Официальный обзор серии стандартов IEC 62443.
15. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования.
16. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности.

17. Secure by Demand: Priority Considerations for Operational Technology Owners and Operators When Selecting Digital Products. CISA, 2025.

References

1. Federal Law No. 187-FZ of July 26, 2017, "On the Security of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation." Official publication.
 2. Order of the Federal Service for Technical and Export Control of Russia No. 239 of December 25, 2017, "On Approval of the Requirements for Ensuring the Security of Significant Facilities of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation." Official website of the Federal Service for Technical and Export Control of Russia.
 3. Order of the Federal Service for Technical and Export Control of Russia No. 31 of March 14, 2014, "On Approval of the Requirements for Ensuring Information Security in Automated Control Systems for Production and Technological Processes at Critical Facilities, Potentially Hazardous Facilities, and Facilities Posing an Increased Danger to Human Life and Health and the Environment." Official website of the Federal Service for Technical and Export Control of Russia.
 4. Stouffer K. A., Pease M., Tang C., Zimmerman T. NIST SP 800-82 Rev. 3. Guide to Operational Technology (OT) Security. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2023.
 5. National Institute of Standards and Technology. NIST Publishes SP 800-82, Revision 3. 2023.
 6. MITRE. ATT&CK for ICS: A Matrix of Tactics and Techniques for Industrial Control Systems. The official MITRE ATT&CK resource.
 7. MITRE. ATT&CK for ICS: Design and Philosophy. 2020.
 8. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA). Securing Industrial Control Systems Fact Sheet. 2020.
 9. CISA, U.S. Department of Energy. Cybersecurity Best Practices for Industrial Control Systems.
 10. International Electrotechnical Commission. IEC 62443 — A Series of Industrial Automation and Control Systems Security Standards. Official IEC Information.
 11. International Electrotechnical Commission. IEC 62443-2-1:2024. Security for Industrial Automation and Control Systems — Requirements for the IACS Security Program.
 12. International Electrotechnical Commission. IEC 62443-4-1:2018. Security for Industrial Automation and Control Systems — Secure Product Development Lifecycle Requirements.
 13. International Electrotechnical Commission. IEC 62443-4-2:2019. Security for Industrial Automation and Control Systems — Technical Security Requirements for IACS Components.
 14. IEC. Understanding IEC 62443. Official Overview of the IEC 62443 Series of Standards.
 15. GOST R ISO/IEC 27001-2021. Information Technology. Security Methods and Tools. Information security management systems. Requirements.
 16. GOST R ISO/IEC 27005-2010. Information technology. Security methods and tools. Information security risk management.
 17. Secure by Demand: Priority Considerations for Operational Technology Owners and Operators When Selecting Digital Products. CISA, 2025.
-



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ТАКТИЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

¹ Башкирев М.В., ²Харитonenков А. И.

ФГАОУ ВО "МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)", Москва, Россия (125993, город Москва, Волоколамское ш., д. 4), e-mail: ¹bashka5502@mail.ru, ²kharitonenkov.a.i@gmail.ru

В статье рассматриваются существующие технологии тактильной обратной связи, применяемые в системах виртуальной реальности, и анализируются подходы к созданию носимых устройств, обеспечивающих передачу кинестетических ощущений при взаимодействии пользователя с виртуальными объектами. Актуальность исследования обусловлена активным развитием систем виртуальной реальности и необходимостью повышения степени иммерсивности за счёт добавления физической составляющей взаимодействия [11, 12].

В работе проведён анализ основных технологий тактильной обратной связи, включая вибрационные, пневматические, электротактильные и кинестетические системы [1-4]. Выполнен сравнительный анализ существующих решений по критериям реалистичности ощущений, сложности реализации, стоимости, эргономичности и пригодности для носимого формата. На основании проведённого анализа обоснована целесообразность использования механизма натяжения нитей как основы для построения компактной тактильной перчатки.

Особое внимание уделено материалам и методам исследования, включающим не только анализ существующих технических решений, но и разработку экспериментального прототипа носимого устройства. Рассматриваются этапы выбора аппаратных компонентов, построения схемы питания и управления, подключения датчиков изгиба, сервоприводов и PWM-драйвера, а также общая логика формирования обратной связи на основе данных о положении пальцев пользователя.

В результате исследования показано, что система натяжения нитей, управляемая сервоприводами и основанная на считывании данных с датчиков изгиба, представляет собой перспективный подход к реализации доступной и функциональной перчатки тактильной обратной связи для виртуальной реальности. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях и при практической реализации носимых VR-устройств.

Ключевые слова: Тактильная обратная связь, виртуальная реальность, кинестетическая обратная связь, тактильная перчатка, сервоприводы, датчики изгиба, PWM-драйвер, носимые устройства

RESEARCH OF HAPTIC FEEDBACK TECHNOLOGIES IN VIRTUAL REALITY SYSTEMS

¹ Bashkirev M.V., ²Kharitonenkov A.I.

"MOSCOW AVIATION INSTITUTE (NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY)", Moscow, Russia (125993, Moscow city, Volokolamskoe sh., 4), e-mail: ¹bashka5502@mail.ru, ²kharitonenkov.a.i@gmail.ru

This article examines existing haptic feedback technologies used in virtual reality systems and analyzes approaches to creating wearable devices that provide kinesthetic sensations during user interaction with virtual objects. The relevance of this research is driven by the rapid development of virtual reality systems and the need to enhance immersion by adding a physical component to interaction.

This paper analyzes the main haptic feedback technologies, including vibration, pneumatic, electrotactile, and kinesthetic systems. A comparative analysis of existing solutions is conducted based on the criteria of sensory

realism, implementation complexity, cost, ergonomics, and suitability for wearable use. Based on this analysis, the feasibility of using a thread tensioning mechanism as the basis for developing a compact haptic glove is substantiated.

Particular attention is given to the materials and research methods, which include not only an analysis of existing technical solutions but also the development of an experimental prototype of a wearable device. The paper examines the stages of selecting hardware components, constructing a power and control circuit, connecting bending sensors, servo drives, and a PWM driver, as well as the general logic for generating feedback based on the user's finger position data.

The results show that a tendon-driven system controlled by servo actuators and based on data acquired from flex sensors is a promising approach for implementing an affordable and functional haptic glove for virtual reality. The obtained results can be used in further research and practical implementation of wearable VR devices.

Keywords: Haptic Feedback, virtual reality, kinesthetic feedback, haptic glove, servo drives, flex sensors, PWM driver, wearable devices

Введение

Современные технологии виртуальной реальности активно развиваются и находят применение в различных областях, включая игровую индустрию, обучение, медицину и инженерное моделирование [2, 7]. Несмотря на значительный прогресс в области визуализации и пространственного звука, проблема передачи тактильных ощущений остаётся одной из ключевых [3].

Отсутствие физической обратной связи снижает уровень погружения пользователя и ограничивает возможности взаимодействия с виртуальной средой [8]. В связи с этим актуальной задачей является разработка доступных и эффективных решений для передачи тактильных и кинестетических ощущений.

Существующие устройства часто либо обладают высокой стоимостью, либо характеризуются громоздкостью и сложностью конструкции [7]. Это делает актуальным поиск альтернативных подходов, позволяющих реализовать тактильную обратную связь в компактных носимых устройствах.

Цель исследования

Целью настоящего исследования является анализ существующих технологий тактильной обратной связи и разработка концепции носимой тактильной перчатки для виртуальной реальности на основе механизма натяжения нитей, обеспечивающего передачу кинестетических ощущений при взаимодействии пользователя с виртуальными объектами [3, 7].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие технологии тактильной обратной связи и определить их основные преимущества и ограничения;
- исследовать механизмы передачи усилия, применяемые в носимых устройствах;
- сформировать требования к разрабатываемой системе тактильной связи;
- подобрать аппаратные компоненты для построения экспериментального прототипа;
- реализовать базовую схему подключения и управления исполнительными механизмами;
- оценить применимость механизма натяжения нитей для построения доступной тактильной перчатки.

Материалы и методы исследования

Методологической основой исследования является системный подход к анализу технологий тактильной обратной связи, сочетающий теоретическое рассмотрение

существующих решений и практическую разработку экспериментального прототипа носимого устройства.

На первом этапе исследования были рассмотрены основные типы систем тактильной обратной связи, применяемые в виртуальной реальности. В рамках анализа использовались методы классификации и сравнительного сопоставления технологий по ряду критериев, включая реализуемый тип ощущений, сложность конструкции, стоимость, эргономичность, точность передачи усилия и пригодность для носимого формата [1–4, 7]. Рассматривались вибрационные, пневматические, электротактильные и кинестетические системы, а также отдельные существующие коммерческие и исследовательские решения.

На втором этапе был выполнен анализ механизмов передачи усилия в носимых устройствах. Особое внимание было уделено тросовым и нитевым механизмам, так как именно они позволяют реализовать ограничение движения пальцев без применения жёстких экзоскелетных конструкций. В рамках данного анализа использовались методы инженерного сравнения и структурного описания вариантов реализации механической части устройства.

Практическая часть исследования включала разработку экспериментального прототипа тактильной перчатки. В качестве аппаратной основы были использованы: микроконтроллер Arduino Nano, PWM-драйвер PCA9685 для управления несколькими каналами сервоприводов, понижающий преобразователь напряжения LM2596, сервоприводы MG90S, датчики изгиба для регистрации положения пальцев, аккумуляторное питание на базе элементов 18650, а также перчатка-основа и система капроновых нитей для передачи усилия [9, 10].

Процесс создания прототипа включал несколько последовательных этапов. На первом шаге была разработана и собрана схема питания устройства. Для обеспечения стабильной работы исполнительных механизмов было принято решение разделить питание логической и силовой части системы: микроконтроллер подключался к персональному компьютеру через USB, а питание сервоприводов осуществлялось от отдельного аккумуляторного источника через понижающий преобразователь LM2596, настроенный на выходное напряжение 5 V. Такой подход позволил исключить перегрузку Arduino и повысить устойчивость работы схемы.

На следующем этапе выполнялось подключение драйвера PCA9685 к микроконтроллеру по интерфейсу I2C. Использование данного модуля позволило реализовать управление несколькими сервоприводами без прямой загрузки PWM-каналов микроконтроллера, что особенно важно при масштабировании системы на несколько пальцев. После этого был проведён первичный тест отдельного сервопривода, позволивший убедиться в корректности подачи сигнала и работоспособности исполнительного механизма.

Отдельное внимание было уделено исследованию датчиков изгиба. В работе использовались гибкие резистивные датчики, сопротивление которых изменяется при изгибе. Для их подключения применялась схема делителя напряжения с использованием резисторов, а считывание данных выполнялось через аналоговые входы Arduino Nano. Были проведены измерения выходных значений в состоянии покоя и при сгибе, что позволило определить рабочий диапазон изменения сигнала и использовать его для дальнейшего управления исполнительными механизмами.

После этого выполнялась программная интеграция датчика изгиба и сервопривода. На данном этапе были разработаны тестовые алгоритмы, позволяющие привязать изменение показаний датчика к командам управления исполнительным механизмом. Экспериментально

было установлено, что для реализации перчатки важно учитывать не только факт изменения сигнала, но и характер работы выбранного сервопривода. В случае использования непрерывных сервоприводов логика управления строилась не как управление абсолютной позицией, а как управление направлением и длительностью вращения, что позволило реализовать натяжение и ослабление нити в зависимости от состояния пальца.

Механическая часть исследования включала выбор основы для перчатки, размещение датчиков изгиба на тыльной стороне пальцев, а также предварительную проработку расположения исполнительных механизмов и барабанов натяжения нитей. В качестве основы была выбрана монтажная перчатка, обладающая достаточной прочностью для крепления компонентов и меньшей растяжимостью по сравнению с обычными трикотажными перчатками. Датчики размещались на тыльной стороне пальцев, где изгиб наиболее корректно передаётся на чувствительный элемент. Передача усилия предполагалась с использованием системы нитей, наматываемых на барабаны, закреплённые на валах сервоприводов.

Таким образом, в работе использовалось сочетание методов сравнительного анализа, экспериментального прототипирования, схмотехнического проектирования и программной настройки исполнительных механизмов. Такой подход позволил не только теоретически обосновать выбор технологии, но и проверить её применимость на уровне базовой практической реализации.

Результаты исследования

В ходе исследования было установлено, что из рассмотренных технологий тактильной обратной связи наиболее доступными являются вибрационные системы, однако они не обеспечивают передачу силы взаимодействия и не позволяют формировать ощущение формы объекта [5]. Пневматические и электротактильные системы обладают своими преимуществами, но имеют ограничения по сложности конструкции, надёжности и удобству использования в носимом формате [4, 6]. Наиболее перспективными для задач имитации физического контакта с виртуальными объектами являются кинестетические системы, создающие ограничение движения и сопротивление.

Анализ механизмов передачи усилия показал, что применение экзоскелетных конструкций обеспечивает высокую точность, но приводит к существенному увеличению массы и сложности устройства. В противоположность этому механизмы натяжения нитей позволяют добиться приемлемого уровня кинестетической обратной связи при значительно меньших массогабаритных характеристиках. Это делает их перспективными для построения носимых тактильных устройств исследовательского и образовательного назначения.

Практическая часть исследования подтвердила возможность построения базовой схемы управления тактильной перчаткой на доступной компонентной базе. Был успешно реализован контур управления сервоприводом через драйвер PCA9685, а также выполнено подключение и считывание данных с датчика изгиба. Установлено, что датчик обеспечивает различные значения в состоянии покоя и при сгибе, что позволяет использовать его как источник управляющей информации.

В процессе экспериментов было выявлено, что стабильность работы системы существенно зависит от правильной организации питания, наличия общего контура заземления и корректной настройки порогов срабатывания. Кроме того, важным фактором является тип используемых сервоприводов. Для задач прямого позиционного управления

более предпочтительны стандартные сервоприводы с ограниченным углом поворота, тогда как непрерывные сервоприводы требуют иной логики управления и усложняют реализацию точного контроля натяжения нити.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о технической реализуемости базового прототипа тактильной перчатки на основе механизма натяжения нитей. Несмотря на необходимость дальнейшей доработки механической части и совершенствования алгоритмов управления, выбранный подход подтверждает свою перспективность как основа для разработки носимых средств тактильной обратной связи в виртуальной реальности.

Заключение

В результате проведённого исследования были проанализированы существующие технологии тактильной обратной связи и выявлены их основные особенности с точки зрения применимости в носимых устройствах виртуальной реальности. Показано, что наиболее перспективным направлением для создания доступной и функциональной тактильной перчатки является использование кинестетической обратной связи, реализуемой посредством механизма натяжения нитей.

В работе было выполнено не только теоретическое исследование, но и начата практическая реализация экспериментального прототипа. Проведён подбор компонентной базы, собрана схема питания и управления, реализовано подключение сервопривода через PWM-драйвер, а также подтверждена возможность использования датчиков изгиба для регистрации движения пальцев.

Полученные результаты подтверждают, что предложенный подход может служить основой для дальнейшей разработки тактильной перчатки, предназначенной для использования в системах виртуальной реальности. Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование механической конструкции, улучшение точности управления натяжением и интеграцию устройства с VR-приложениями.

Таблица 1 - Сравнительный анализ текущих технологий тактильной связи

Технология	Преимущества	Ограничения
Гаптические перчатки	Реалистичные ощущения, точность взаимодействия	Высокая стоимость, ограниченный рынок
Ультразвуковые технологии	Без необходимости носить устройства	Низкая точность, высокая требовательность к ресурсам
Электротактильные системы	Компактность, широкий спектр ощущений	Сложность настройки, необходимость контроля безопасности
Кинестетическая обратная связь	Реалистичное ощущение усилий и сопротивления	Высокая стоимость, большие размеры устройств

Источник: анализ автора

Список литературы

1. Колбин А.И., Петров С.В. Системы тактильной обратной связи в виртуальной реальности: учебное пособие. — Москва: МГТУ им. Баумана, 2020. — 254 с.

2. Lécuyer A. Simulating haptic feedback using vision: a survey of research and applications of pseudo-haptic feedback // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. — 2009. — Vol. 18, № 1. — pp. 39–53.
3. Salisbury J.K., Srinivasan M.A. Phantom-based haptic interaction with virtual objects // IEEE Computer Graphics and Applications. — 1997. — Vol. 17, № 6. — pp. 6–10.
4. Pacchierotti C., Prattichizzo D., Kuchenbecker K.J. Cutaneous feedback of fingertip deformation and vibration for palpation in robotic surgery // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 2015. — Vol. 63, № 2. — pp. 278–287.
5. Ekman I., Rinman E., Desainte-Catherine M. Sonic interactions and compositional approaches for vibrotactile effects // Proceedings of Audio Mostly. — New York: ACM, 2014. — pp. 31–38.
6. Nakamura M., Nishimura H., Yamamoto S. Ultrasound-based mid-air haptic feedback: principles and applications // IEEE Transactions on Haptics. — 2019. — Vol. 12, № 1. — pp. 2–17.
7. Berdekas T., Vissell Y. Wearable multimodal haptic devices for touch and manipulation in virtual and augmented reality // IEEE Transactions on Haptics. — 2021. — Vol. 14, № 2. — pp. 241–253.
8. Tachji S. Telexistence: vision of the future society // Human Haptic Perception. — Basel: Birkhäuser, 2005. — pp. 456–460.
9. Miles R., Hamilton K. Learning UML 2.0: a pragmatic introduction to model-driven development. — Sebastopol: O'Reilly, 2006. — p.384
10. The Archi Team. Archi User Guide. — London: Archi Foundation, 2023. — 150 p.
11. Статья о последних разработках гаптических интерфейсов для реалистичного тактильного ощущения в VR // IEEE Spectrum. URL: <https://spectrum.ieee.org/haptic-feedback> (дата обращения: 26.10.2025).
12. Статья об исследовании влияния тактильной обратной связи на погружение пользователя в VR // MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2813-2084/4/1/3> (дата обращения: 15.10.2025).

References

1. Kolbin A.I., Petrov S.V. Haptic Feedback Systems in Virtual Reality: A Tutorial. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2020, p. 254
2. Lécuyer A. Simulating haptic feedback using vision: a survey of research and applications of pseudo-haptic feedback // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. 2009, Vol. 18, No. 1, pp. 39–53.
3. Salisbury J.K., Srinivasan M.A. Phantom-based haptic interaction with virtual objects // IEEE Computer Graphics and Applications. 1997, Vol. 17, No. 6, pp. 6–10.
4. Pacchierotti C., Prattichizzo D., Kuchenbecker K.J. Cutaneous feedback of fingertip deformation and vibration for palpation in robotic surgery // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. - 2015. - Vol. 63, No. 2. - pp. 278–287.
5. Ekman I., Rinman E., Desainte-Catherine M. Sonic interactions and compositional approaches for vibrotactile effects // Proceedings of Audio Mostly. — New York: ACM, 2014. — pp. 31–38.

6. Nakamura M., Nishimura H., Yamamoto S. Ultrasound-based mid-air haptic feedback: principles and applications // IEEE Transactions on Haptics. — 2019. — Vol. 12, No. 1. - pp. 2–17.
 7. Berdekas T., Vissell Y. Wearable multimodal haptic devices for touch and manipulation in virtual and augmented reality // IEEE Transactions on Haptics. — 2021. — Vol. 14, No. 2. - pp. 241–253.
 8. Tachji S. Telexistence: vision of the future society // Human Haptic Perception. - Basel: Birkhäuser, 2005. - pp. 456–460.
 9. Miles R., Hamilton K. Learning UML 2.0: a pragmatic introduction to model-driven development. — Sebastopol: O'Reilly, 2006. — p. 384
 10. The Archi Team. Archi User Guide. - London: Archi Foundation, 2023. - p.150
 11. Article on the latest developments in haptic interfaces for realistic tactile sensation in VR // IEEE Spectrum. URL: <https://spectrum.ieee.org/haptic-feedback> (date of access: 26.10.2025).
 12. Article on the study of the influence of haptic feedback on user immersion in VR // MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2813-2084/4/1/3> (date of access: 15.10.2025).
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.912:004.85:004.822:519.22

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВ: ОТ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ К БОЛЬШИМ ЯЗЫКОВЫМ МОДЕЛЯМ

Теремов И.А.

ФГБОУ ВО «МИРЭА - РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Москва, Россия (119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78, стр. 4), e-mail: ivan.teremow2011@yandex.ru

Статья прослеживает развитие методов классификации текстов от статистических моделей к эмбединговым, трансформерным и LLM-ориентированным подходам. Рассмотрены постановка задачи, способы представления текста, классические классификаторы, ранние архитектуры глубокого обучения и современные схемы с использованием больших языковых моделей. Основная линия развития состоит в переходе от частотных признаков к контекстно-зависимым представлениям, а затем к моделям, которые учитывают не только сам текст, но и формулировку задачи. Выбор подхода зависит от доступной разметки, требований к интерпретируемости и вычислительных ограничений.

Ключевые слова: Классификация текстов, машинное обучение, обработка естественного языка, эмбединги, трансформер, большие языковые модели, тематическое моделирование, SVM, деревья решений, ансамбли, вероятностные модели, глубокое обучение.

DEVELOPMENT OF TEXT CLASSIFICATION METHODS: FROM STATISTICAL MODELS TO LARGE LANGUAGE MODELS

Teremov I.A.

MIREA - RUSSIAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, Moscow, Russia (119454, Moscow, avenue Vernadsky, 78, b. 4), e-mail: ivan.teremow2011@yandex.ru

This article traces the development of text classification methods from statistical models to embedding, transformer, and LLM-based approaches. The paper considers the problem statement, text representation methods, classical classifiers, early deep learning architectures, and modern schemes using large language models. The main line of development is the transition from frequency features to context-sensitive representations, and then to models that take into account not only the text itself but also the problem statement. The choice of approach depends on the available markup, interpretability requirements, and computational constraints.

Keywords: Text classification, machine learning, natural language processing, embeddings, transformer, large language model, topic modeling, SVM, decision tree, ensemble model, probabilistic model, deep learning.

Классификация текстов остается одной из базовых задач обработки естественного языка и интеллектуального анализа текстовых данных, поскольку позволяет переводить большие массивы неструктурированных текстов в систему меток, пригодную для поиска, сортировки и автоматической обработки [1,2]. Такие методы используют при маршрутизации и архивировании документов, фильтрации контента, анализе обращений пользователей, категоризации научных публикаций и в других прикладных сценариях, где решение должно быстро соотносить текст с заданным набором тематических или функциональных категорий. По мере развития области менялись не только алгоритмы, но и само представление текста:

разреженные признаки и классические методы машинного обучения постепенно уступили место эмбединговым моделям, трансформерам и LLM-ориентированным схемам. В статье сопоставляются эти группы подходов, прослеживается их общая траектория развития и обсуждаются их области применимости и ограничения.

Общая задача классификации текстов

Классификация текстов и текстовых документов — это задача автоматического отнесения текстового объекта к одному или нескольким заранее заданным классам по его содержательным и формальным признакам. В формальном виде ее можно представить как построение отображения

$$f: \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{Y},$$

где $\mathcal{D}$ обозначает множество текстовых документов, а $\mathcal{Y}$ — множество допустимых меток классов; в многометочной постановке вместо одной метки рассматривается подмножество $\mathcal{Y}$, то есть $f: \mathcal{D} \rightarrow 2^{\mathcal{Y}}$. Объектом классификации может быть короткий фрагмент текста, отдельное сообщение, аннотация, статья, нормативный документ или иной протяженный корпус. В работах [1,2] эта задача рассматривается как базовая для интеллектуального анализа текстовых данных, поскольку на ней основаны тематическая маршрутизация документов, фильтрация контента, анализ обращений пользователей и категоризация научных публикаций.

По структуре целевой разметки классификация может быть *бинарной*, если документ относится к одному из двух классов, *многоклассовой*, если из набора взаимоисключающих меток выбирается одна, и *многометочной*, если одному документу одновременно сопоставляется несколько независимых меток. Число допустимых классов задается мощностью множества меток

$$K = |\mathcal{Y}|,$$

где K определяет размерность пространства решений в бинарной и многоклассовой постановках, а в многометочной постановке число потенциально допустимых комбинаций меток в общем виде составляет $|2^{\mathcal{Y}}| = 2^K$.

В прикладных системах выделяют и некоторые схожие задачи, например *тематическую классификацию* (англ. — *topic classification*), где модель должна либо определить доминирующую тематику документа, либо построить набор релевантных категорий для дальнейшей индексации и поиска. Качество решения зависит от характеристик корпуса, полноты и согласованности разметки, способа представления текста и выбранных метрик оценки.

Традиционные методы классификации

Классические статистические методы стали первой широко распространенной группой подходов к автоматической классификации текстов. Внутри этой линии удобно различать два уровня: способ представления документа в признаковом пространстве и алгоритм, который по этому представлению принимает решение о классе. Это различие важно для дальнейшего обзора, поскольку ранние методы опирались прежде всего на разреженные признаки вроде BoW и TF-IDF, тогда как позднее в задачу вошли плотные векторные представления. Ниже эти уровни рассматриваются по отдельности.

Статистические представления

Построение векторного представления текста можно рассматривать как частный случай извлечения признаков, когда документ переводится в пространство, сохраняющее статистические, структурные или семантические свойства корпуса. Для ранних методов точнее говорить не об эмбедингах в современном узком смысле, а о признаковых описаниях и разреженных векторных представлениях. Наиболее распространены схемы на основе т.н. "мешка слов" (англ. – BoW – *bag-of-words*), метода *TF-IDF* (англ. – *Term Frequency-Inverse Document Frequency*), словарных признаков и *n*-грамм, которые фиксируют частоты отдельных терминов и устойчивые локальные сочетания слов. Такие представления долго оставались основой тематической категоризации, поскольку их легко формализовать и применять к крупным коллекциям документов [1,3].

Промежуточным звеном между разреженными частотными признаками и более поздними плотными эмбедингами стала модель "непрерывного мешка слов" (англ. – *continuous bag-of-words*, CBOW), предложенная в архитектуре Word2Vec [4]. В этой постановке модель по окружающему контексту предсказывает центральное слово, поэтому слова из сходных контекстов получают близкие векторные представления. В отличие от BoW и TF-IDF, где признаки в основном фиксируют факт присутствия термина и его частоту, CBOW учитывает распределение контекстов и частично отражает семантическую близость лексических единиц. Для классификации текстов это стало шагом от словарного описания документа к признакам, которые лучше обобщают синонимию и вариативность формулировок и при этом сохраняют сравнительно простую схему обучения.

Латентное размещение Дирихле (англ. – *Latent Dirichlet Allocation*, LDA) представляет другую линию развития статистических представлений, в которой документ описывается не через отдельные слова, а через распределение по скрытым темам [5]. В такой модели каждая тема задается вероятностным распределением по терминам, а сам документ интерпретируется как смесь нескольких тем в различных пропорциях. При этом LDA обычно рассматривают прежде всего как метод тематического моделирования, а не как основной инструмент построения эмбедингов в современном понимании этого термина. Тем не менее тематические распределения документа, полученные средствами LDA и его модификаций, могут использоваться [6] как компактные векторные признаки для последующей классификации, то есть фактически как специализированное низкоразмерное представление текста. По сравнению с BoW и TF-IDF такой подход слабее привязан к отдельным лексемам и позволяет выделять более устойчивую тематическую структуру корпуса, однако качество представления заметно зависит от выбранного числа тем и от того, насколько хорошо вероятностная модель соответствует реальному распределению текстов.

Статические эмбединги

Дальнейшее развитие было связано с переходом от чисто разреженных частотных описаний к *распределенным векторным представлениям слов* (англ. – *distributed word representations*). Модели Word2Vec и GloVe показали, что лексические единицы можно представлять в виде т.н. *плотных векторов* (англ. – *dense vectors*), в которых частично отражаются контекстная близость и статистика совместной встречаемости [4,7]. Ключевая

идея применения плотных векторов заключается в компактном представлении фиксированной размерности, где значимая информация распределена по многим координатам одновременно, в отличие от разреженных BoW- и TF-IDF-векторов, в которых большая часть компонент равна нулю. Более того, если BoW и TF-IDF обычно строятся заново под конкретный корпус текстов, подлежащих классификации, и потому сильнее зависят от его словаря и распределения частот, то GloVe-эмбединги могут быть предварительно обучены на больших внешних коллекциях текстов и затем перенесены в задачи классификации на других корпусах, сохраняя часть семантической информации даже при изменении лексического состава и оставаясь при этом относительно универсальным способом построения векторных представлений.

Классические классификаторы

Вероятностные модели. К этому классу в задачах классификации текстов обычно относят прежде всего *наивный байесовский анализ* и *логистическую регрессию*. Наивный байесовский подход оценивает вероятность принадлежности документа классу по распределению терминов и потому удобен как базовый метод для разреженных признаковых представлений, в частности для BoW- и TF-IDF-векторов [1,2]. Логистическая регрессия, в свою очередь, моделирует апостериорную вероятность класса непосредственно по признакам документа и на практике часто служит сильным линейным базовым алгоритмом для многоклассовой и многометочной категоризации текстов. Преимуществом этой группы методов являются сравнительная простота обучения, хорошая интерпретируемость коэффициентов и возможность получать не только итоговую метку, но и вероятностную оценку уверенности. Вместе с тем такие модели во многом зависят от качества исходного признакового описания текста и обычно ограничено учитывают более сложные нелинейные и контекстные зависимости между словами.

Методы на основе k-ближайших соседей. Метод *k-ближайших соседей* (англ. – *k-nearest neighbors*, k-NN) относится к экзemplарно-ориентированным алгоритмам классификации: решение для нового документа принимается на основе меток наиболее похожих объектов обучающей выборки. В задачах классификации текстов такой подход обычно реализуется в векторном пространстве признаков, где близость между документами вычисляется по косинусной мере или другим функциям сходства над TF-IDF- либо эмбединговыми представлениями [2]. Преимуществами k-NN являются концептуальная простота, отсутствие явного этапа обучения параметрической модели и естественная интерпретируемость результата через ближайшие примеры. Однако качество метода сильно зависит от выбора метрики, параметра *k* и влияния нерелевантных признаков в высокоразмерном пространстве текста. Поэтому развитие базового k-NN пошло в сторону схем взвешивания соседей и признаков; в частности, модификации семейства *weighted k-NN* и *weight-adjusted k-NN* усиливают вклад наиболее информативных признаков и более релевантных соседей, что позволяет повысить устойчивость классификации на разреженных текстовых данных [8].

Методы на основе SVM. Метод *машин опорных векторов* (англ. – *support vector machine*, SVM) рассматривает задачу классификации как поиск разделяющей гиперплоскости

с максимальным зазором между классами в признаковом пространстве. Для текстовой категоризации линейные SVM оказались особенно эффективны благодаря способности устойчиво работать в условиях высокой размерности и разреженности признаков; это было показано уже в ранних работах по автоматической классификации документов [9]. Развитием этого направления стали *трансдуктивные машины опорных векторов* (англ. – *transductive support vector machine*, TSVM), которые, в отличие от стандартной индуктивной постановки, используют не только размеченные обучающие документы, но и структуру неразмеченного набора, для которого требуется предсказание [10]. Такой подход особенно полезен в сценариях с малым числом размеченных примеров, когда модель может уточнять разделяющую поверхность с учетом распределения тестовых данных. Вместе с тем преимущества TSVM обычно достигаются ценой более сложного обучения и более высоких вычислительных затрат по сравнению с обычными линейными SVM.

Методы на основе деревьев решений. Методы на основе *деревьев решений* (англ. – *decision trees*) строят иерархию последовательных правил разбиения признакового пространства, в которой внутренние узлы задают проверки по признакам документа, а листья соответствуют итоговым классам. Для задач классификации текстов такие модели привлекательны своей интерпретируемостью, поскольку итоговое решение можно представить в виде набора читаемых условий по терминам, весам или другим извлеченным признакам. Классическим этапом развития этого направления стал алгоритм *ID3*, использующий информационный выигрыш для выбора наиболее информативного признака при каждом разбиении [11]. Дальнейшие модификации были направлены на повышение устойчивости дерева к шуму, непрерывным значениям и неопределенности в данных; в частности, *нечеткие деревья решений* (англ. – *fuzzy decision trees*, FDT) переносят разбиения в нечеткую постановку и позволяют мягче учитывать размытые границы между классами и признаками [12]. В текстовой классификации это может быть полезно, когда признаки отражают не жесткое присутствие термина, а степень тематической принадлежности или неоднозначные языковые характеристики, хотя на практике деревья решений обычно уступают более сильным линейным и нейросетевым моделям по устойчивости на больших разреженных корпусах.

Интегральные методы. Интегральные методы объединяют несколько базовых классификаторов в единую модель, стремясь получить более высокое качество по сравнению с каждым отдельным алгоритмом. В задачах классификации текстов такие подходы применяются для повышения устойчивости к шуму и лучшего использования разнородных признаковых представлений. Одним из наиболее известных примеров является *AdaBoost*, в котором последовательность слабых классификаторов обучается так, чтобы на каждом шаге большее внимание уделялось ранее ошибочно классифицированным документам [13]. В результате итоговая модель формируется как взвешенная комбинация нескольких относительно простых решающих правил, что позволяет уменьшить смещение базового алгоритма и повысить качество на сложных выборках. В текстовой категоризации бустинг нередко сочетают с простыми деревьями решений, линейными разделителями или правилами, однако его практическая эффективность зависит от устойчивости базового классификатора и

чувствительности к шумовым признакам, поскольку при неудачной настройке ансамбль может усиливать ошибки на редких или неоднозначных примерах.

Методы глубокого обучения

Ранние архитектуры глубокого обучения для классификации текстов разрабатывались как специализированные нейросетевые модели, которые должны были извлекать признаки гибче, чем линейные алгоритмы и ручная инженерия признаков. *Многослойные перцептроны* (англ. – *multilayer perceptrons*, MLP) использовались как базовый вариант глубоких классификаторов: документ сначала переводился в фиксированный вектор признаков или усредненных эмбеддингов, а затем подавался на несколько полносвязных слоев. Такой подход позволял моделировать нелинейные зависимости, но почти не учитывал внутреннюю структуру последовательности текста [2]. *Сверточные нейронные сети* (англ. – *convolutional neural networks*, CNN) лучше выделяли локальные шаблоны, соответствующие информативным n -граммам и устойчивым фразовым конструкциям, а операция пулинга агрегировала наиболее значимые признаки документа [14]. *Рекуррентные нейронные сети* (англ. – *recurrent neural networks*, RNN), включая варианты с *долгой краткосрочной памятью* (англ. – *long short-term memory*, LSTM) и *управляемыми рекуррентными блоками* (англ. – *gated recurrent unit*, GRU), лучше учитывали порядок слов и зависимости между удаленными фрагментами текста, что важно для длинных документов и контекстно чувствительной классификации [15]. В совокупности эти архитектуры показали, что качество можно заметно повысить за счет совместного обучения представления текста и самого классификатора, но каждая из них упиралась либо в локальность окна, либо в трудности моделирования дальнего контекста. Именно это подготовило переход к трансформерным моделям.

Переход к *трансформерным моделям* был связан с тем, что механизм *самовнимания* (англ. – *self-attention*) позволил учитывать зависимости между любыми фрагментами текста без последовательного прохода, характерного для рекуррентных сетей. Для задач классификации текстов особенно важными стали *encoder-модели*, в которых входной документ преобразуется в контекстно-зависимые представления всех токенов, а итоговое решение принимается по специальному агрегирующему представлению или по pooled-вектору документа. Наиболее известным примером такого подхода стала модель *BERT*, показавшая, что предварительное обучение глубокого двунаправленного трансформера на больших размеченных корпусах с последующим дообучением под конкретную задачу дает существенный прирост качества на широком круге задач понимания текста, включая классификацию [16]. Наряду с *encoder-архитектурами* развивались и *encoder-decoder-модели*, в которых классификация может быть сформулирована как задача порождения текстовой метки или краткого ответа; такой подход получил систематическое оформление, например, в модели *T5*, где различные задачи обработки языка, включая классификацию, приводятся к единому формату “текст на входе – текст на выходе” [17]. По сравнению с ранними CNN- и RNN-архитектурами трансформеры обеспечили более универсальное и переносимое представление текста, однако ценой этого стали рост вычислительных затрат и зависимости качества от масштаба предобучения и доступных ресурсов для дообучения.

Подходы с использованием больших языковых моделей (англ. – *LLM-guided methods*; далее — LLM-подходы) объединяют схемы, где большая языковая модель выступает не

только источником признакового представления, но и участником интерпретации самой задачи классификации. Модель получает текст документа, описание целевых меток и, при необходимости, дополнительные инструкции о требуемом формате ответа. Благодаря этому классификация может выполняться в *режиме без примеров* (англ. – *zero-shot*) и *режиме с малым числом примеров* (англ. – *few-shot*), когда модель либо не дообучается на размеченном корпусе, либо получает лишь небольшое число демонстрационных примеров в самом запросе [18,19]. В таких схемах важны *вербализация* (англ. – *verbalization*) меток, то есть перевод классов в понятные для модели текстовые описания, и *формулировка задачи на основе инструкций* (англ. – *instruction-based formulation*), которая яснее задает критерии выбора категории. Работа [20] показывает, что промпт-ориентированная постановка сближает задачу классификации с предсказанием текста и позволяет использовать единые генеративные модели в широком круге прикладных сценариев.

Дальнейшее развитие LLM-подходов связано с включением в вывод дополнительных механизмов рассуждения и внешнего контекста. *Цепочки рассуждений* (англ. – *chain-of-thought*) и *схемы, управляемые рассуждением* (англ. – *reasoning-guided schemes*) побуждают модель не только выдать итоговую метку, но и развернуть промежуточные основания выбора класса, а *самосогласованность* (англ. – *self-consistency*) повышает устойчивость решения за счет согласования нескольких независимых траекторий рассуждения [21,22]. Когда нужно учитывать специализированное предметное знание, применяются *подходы с расширением за счет извлечения* (англ. – *retrieval augmentation approaches*), которые дополняют запрос к модели релевантными фрагментами из внешнего корпуса [23]. В таких схемах большая языковая модель остается непосредственным участником вывода и принимает решение по текущему запросу с учетом инструкций и внешнего контекста.

Другая линия развития использует LLM не для непосредственного присвоения метки, а как вспомогательный компонент более широкого конвейера. В таких сценариях модель генерирует синтетические обучающие примеры и пояснения, которые затем применяются при обучении или адаптации более компактных классификаторов. *Схема учитель–ученик* (англ. – *teacher-student scheme*) и различные формы дистилляции позволяют перенести часть качества и гибкости больших моделей в системы с меньшей стоимостью эксплуатации [24,25]. В результате LLM-подходы меняют не только механизм предсказания, но и организацию всей процедуры классификации, включая подготовку данных, адаптацию модели и формирование объяснений.

Сравнительный анализ подходов

Если сопоставить рассмотренные методы, видно, что развитие классификации текстов шло через постепенное расширение того, что считается информативным представлением документа. На раннем этапе основное внимание уделялось наблюдаемым лексическим признакам: частотам терминов, *n*-граммам и различным схемам взвешивания. Этого хватало, чтобы свести текст к формально измеримому объекту и применять надежные, вычислительно доступные алгоритмы. Позднее стало ясно, что одной статистики поверхностных признаков недостаточно для устойчивой работы в условиях синонимии, тематических сдвигов и вариативности формулировок. Именно это и подтолкнуло область к более содержательным представлениям текста.

Вероятностные, тематические и другие классические модели заняли в этой траектории промежуточное место. Они сохраняли идею явного признакового пространства, но пытались гибче описывать внутреннюю структуру классов и тематическое строение документов. Затем основной сдвиг произошел уже не столько на уровне алгоритма, сколько на уровне кодирования текста. Эмбединговые методы перенесли акцент с совпадения слов на близость смыслов. Это повысило устойчивость к лексической вариативности и улучшило переносимость между корпусами, но одновременно усилило зависимость от предобученных моделей, вычислительных ресурсов и менее прозрачных представлений.

LLM-подходы продолжают этот вектор, но одновременно меняют и саму процедуру классификации: большая языковая модель сопоставляет документ, метку, инструкцию и контекст в рамках одного вывода. Здесь область смещается от моделей, распознающих статистические различия между документами, к моделям, которые в большей степени интерпретируют само задание. Такой сдвиг особенно заметен в сценариях, где классы меняются, разметка ограничена, а от системы требуется адаптация к новым формулировкам и предметным областям. У этой гибкости есть цена: растут требования к вычислительным ресурсам, усложняется контроль воспроизводимости, а объяснение результата все чаще переносится с уровня явных признаков на уровень поведения модели.

Эти семейства методов не стоит рассматривать как полностью взаимоисключающие. Классические статистические методы сохраняют ценность в задачах с устойчивым словарем, ограниченными ресурсами и высокими требованиями к прозрачности модели. Эмбединговые методы полезны там, где нужно учитывать семантическую близость и получать приемлемое качество без сложной генеративной инфраструктуры. LLM-подходы уместны в динамических и слабо формализованных сценариях, где важны zero-shot- и few-shot-режимы, использование внешнего знания и гибкая адаптация схемы классификации под конкретный запрос. В целом развитие идет от признакового описания текста к семантическому представлению, а затем к интерпретации самой задачи, когда модель работает не только с документом, но и с формулировкой процедуры принятия решения.

При этом почти все supervised- и semi-supervised-подходы, рассмотренные выше, остаются связаны с двумя фундаментальными предпосылками. Во-первых, даже если часть корпуса остается неразмеченной, модели требуется обучающая выборка, задающая хотя бы начальную структуру разделения классов; в отсутствие такой опоры качество обычно резко зависит от стоимости ручной разметки, репрезентативности примеров и устойчивости меток к предметному сдвигу [1,2,10]. Во-вторых, сама постановка классификации чаще всего предполагает, что множество классов известно заранее и остается конечным на этапах обучения и вывода: модель распределяет документы по уже заданному пространству меток, но не решает задачу самостоятельного формирования новых категорий. В более общем случае это ограничение переходит в задачу индукции таксономий, где требуется не только отнести документ к существующему классу, но и построить или уточнить саму иерархию классов и отношений подчинения между ними [26]. Именно здесь особенно заметно различие между классификацией в фиксированном пространстве меток и более открытыми сценариями организации знаний, в которых набор категорий не задан полностью заранее.

Заключение

История методов классификации текстов показывает, что по мере развития области менялись и способы представления текста, и сам характер вывода: разреженные лексические признаки и классические линейные классификаторы уступили место плотным семантическим представлениям, затем контекстным трансформерным моделям и, наконец, LLM-подходам, в которых решение все чаще строится как интерпретация документа, метки, инструкции и внешнего контекста. Из этого следует простой практический вывод: универсального метода для всех сценариев нет. Классические статистические подходы остаются полезными при устойчивом словаре, качественной разметке и высоких требованиях к прозрачности модели; эмбединговые и трансформерные методы оправданы там, где нужно лучше учитывать семантическую вариативность и контекст; LLM-подходы особенно интересны в динамических предметных областях с ограниченной разметкой и потребностью в zero-shot- или few-shot-адаптации.

Список литературы

1. Sebastiani F. Machine learning in automated text categorization // ACM Comput. Surv. 2002. Т. 34, № 1. С. 1–47.
2. Kowsari K. и др. Text Classification Algorithms: A Survey // Inf. 2019. Т. 10, № 4. С. 150.
3. Manning C. D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to information retrieval. Cambridge University Press, 2008.
4. Mikolov T. и др. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space // 1st International Conference on Learning Representations, ICLR 2013, Scottsdale, Arizona, USA, May 2-4, 2013, Workshop Track Proceedings / под ред. Bengio Y., LeCun Y. 2013.
5. Blei D. M., Ng A. Y., Jordan M. I. Latent Dirichlet Allocation // J. Mach. Learn. Res. 2003. Т. 3. С. 993–1022.
6. Wahid J. A. и др. Topic2features: a novel framework to classify noisy and sparse textual data using LDA topic distributions // PeerJ Comput. Sci. 2021. Т. 7. С. e677.
7. Pennington J., Socher R., Manning C. D. Glove: Global Vectors for Word Representation // Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2014, October 25-29, 2014, Doha, Qatar, A meeting of SIGDAT, a Special Interest Group of the ACL / под ред. Moschitti A., Pang B., Daelemans W. ACL, 2014. С. 1532–1543.
8. Han E.-H., Karypis G., Kumar V. Text Categorization Using Weight Adjusted k-Nearest Neighbor Classification // Knowledge Discovery and Data Mining - PAKDD 2001, 5th Pacific-Asia Conference, Hong Kong, China, April 16-18, 2001, Proceedings / под ред. Cheung D. W.-L., Williams G. J., Li Q. Springer, 2001. С. 53–65.
9. Joachims T. Text Categorization with Support Vector Machines: Learning with Many Relevant Features // Machine Learning: ECML-98, 10th European Conference on Machine Learning, Chemnitz, Germany, April 21-23, 1998, Proceedings / под ред. Nedellec C., Rouveirol C. Springer, 1998. С. 137–142.
10. Joachims T. Transductive Inference for Text Classification using Support Vector Machines // Proceedings of the Sixteenth International Conference on Machine Learning (ICML 1999), Bled, Slovenia, June 27 - 30, 1999 / под ред. Bratko I., Dzeroski S. Morgan Kaufmann, 1999. С. 200–209.
11. Quinlan J. R. Induction of Decision Trees // Mach. Learn. 1986. Т. 1, № 1. С. 81–106.

12. Wang T. и др. A Survey of Fuzzy Decision Tree Classifier Methodology // Fuzzy Information and Engineering, Proceedings of the Second International Conference of Fuzzy Information and Engineering, ICFIE 2007, May 13-16, 2007, Guangzhou, China / под ред. Cao B. Springer, 2007. С. 959–968.
13. Freund Y., Schapire R. E. A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting // J. Comput. Syst. Sci. 1997. Т. 55, № 1. С. 119–139.
14. Kim Y. Convolutional Neural Networks for Sentence Classification // Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2014, October 25-29, 2014, Doha, Qatar, A meeting of SIGDAT, a Special Interest Group of the ACL / под ред. Moschitti A., Pang B., Daelemans W. ACL, 2014. С. 1746–1751.
15. Lai S. и др. Recurrent Convolutional Neural Networks for Text Classification // Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence, January 25-30, 2015, Austin, Texas, USA / под ред. Bonet B., Koenig S. AAAI Press, 2015. С. 2267–2273.
16. Devlin J. и др. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, NAACL-HLT 2019, Minneapolis, MN, USA, June 2-7, 2019, Volume 1 (Long and Short Papers) / под ред. Burstein J., Doran C., Solorio T. Association for Computational Linguistics, 2019. С. 4171–4186.
17. Raffel C. и др. Exploring the Limits of Transfer Learning with a Unified Text-to-Text Transformer // J. Mach. Learn. Res. 2020. Т. 21. С. 140:1–140:67.
18. Brown T. B. и др. Language Models are Few-Shot Learners // Advances in Neural Information Processing Systems 33: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2020, NeurIPS 2020, December 6-12, 2020, virtual / под ред. Larochelle H. и др. 2020.
19. Sanh V. и др. Multitask Prompted Training Enables Zero-Shot Task Generalization // The Tenth International Conference on Learning Representations, ICLR 2022, Virtual Event, April 25-29, 2022. OpenReview.net, 2022.
20. Liu P. и др. Pre-train, Prompt, and Predict: A Systematic Survey of Prompting Methods in Natural Language Processing // CoRR. 2021. Т. abs/2107.13586.
21. Wei J. и др. Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models // Advances in Neural Information Processing Systems 35: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2022, NeurIPS 2022, New Orleans, LA, USA, November 28 - December 9, 2022 / под ред. Koyejo S. и др. 2022.
22. Wang X. и др. Self-Consistency Improves Chain of Thought Reasoning in Language Models // The Eleventh International Conference on Learning Representations, ICLR 2023, Kigali, Rwanda, May 1-5, 2023. OpenReview.net, 2023.
23. Lewis P. и др. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // Advances in Neural Information Processing Systems 33: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2020, NeurIPS 2020, December 6-12, 2020, virtual / под ред. Larochelle H. и др. 2020.
24. Wang Y. и др. Self-Instruct: Aligning Language Models with Self-Generated Instructions // Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers), ACL 2023, Toronto, Canada, July 9-14, 2023 / под ред. Rogers A.,

- Boyd-Graber J. L., Okazaki N. Association for Computational Linguistics, 2023. С. 13484–13508.
25. Hsieh C.-Y. и др. Distilling Step-by-Step! Outperforming Larger Language Models with Less Training Data and Smaller Model Sizes // Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2023, Toronto, Canada, July 9-14, 2023 / под ред. Rogers A., Boyd-Graber J. L., Okazaki N. Association for Computational Linguistics, 2023. С. 8003–8017.
26. Wang C., He X., Zhou A. A Short Survey on Taxonomy Learning from Text Corpora: Issues, Resources and Recent Advances // Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2017, Copenhagen, Denmark, September 9-11, 2017 / под ред. Palmer M., Hwa R., Riedel S. Association for Computational Linguistics, 2017. С. 1190–1203.

References

1. Sebastiani F. Machine learning in automated text categorization // ACM Comput. Surv. 2002. Т. 34, № 1. pp. 1–47.
2. Kowsari K. et al. Text Classification Algorithms: A Survey // Inf. 2019. Т. 10, № 4. pp. 150.
3. Manning C. D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to information retrieval. Cambridge University Press, 2008.
4. Mikolov T. et al. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space // 1st International Conference on Learning Representations, ICLR 2013, Scottsdale, Arizona, USA, May 2-4, 2013, Workshop Track Proceedings / под ред. Bengio Y., LeCun Y. 2013.
5. Blei D. M., Ng A. Y., Jordan M. I. Latent Dirichlet Allocation // J. Mach. Learn. Res. 2003. Т. 3. pp. 993–1022.
6. Wahid J. A. et al. Topic2features: a novel framework to classify noisy and sparse textual data using LDA topic distributions // PeerJ Comput. Sci. 2021. Т. 7. pp. e677.
7. Pennington J., Socher R., Manning C. D. Glove: Global Vectors for Word Representation // Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2014, October 25-29, 2014, Doha, Qatar, A meeting of SIGDAT, a Special Interest Group of the ACL / ed. Moschitti A., Pang B., Daelemans W. ACL, 2014. pp. 1532–1543.
8. Han E.-H., Karypis G., Kumar V. Text Categorization Using Weight Adjusted k-Nearest Neighbor Classification // Knowledge Discovery and Data Mining - PAKDD 2001, 5th Pacific-Asia Conference, Hong Kong, China, April 16-18, 2001, Proceedings / ed. Cheung D. W.-L., Williams G. J., Li Q. Springer, 2001. pp. 53–65.
9. Joachims T. Text Categorization with Support Vector Machines: Learning with Many Relevant Features // Machine Learning: ECML-98, 10th European Conference on Machine Learning, Chemnitz, Germany, April 21-23, 1998, Proceedings / ed. Nedellec C., Rouveirol C. Springer, 1998. pp. 137–142.
10. Joachims T. Transductive Inference for Text Classification using Support Vector Machines // Proceedings of the Sixteenth International Conference on Machine Learning (ICML 1999), Bled, Slovenia, June 27 - 30, 1999 / ed. Bratko I., Dzeroski S. Morgan Kaufmann, 1999. pp. 200–209.
11. Quinlan J. R. Induction of Decision Trees // Mach. Learn. 1986. Т. 1, № 1. pp. 81–106.

12. Wang T. et al. A Survey of Fuzzy Decision Tree Classifier Methodology // Fuzzy Information and Engineering, Proceedings of the Second International Conference of Fuzzy Information and Engineering, ICFIE 2007, May 13-16, 2007, Guangzhou, China / ed. Cao B. Springer, 2007. pp. 959–968.
13. Freund Y., Schapire R. E. A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting // J. Comput. Syst. Sci. 1997. T. 55, № 1. pp. 119–139.
14. Kim Y. Convolutional Neural Networks for Sentence Classification // Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2014, October 25-29, 2014, Doha, Qatar, A meeting of SIGDAT, a Special Interest Group of the ACL / ed. Moschitti A., Pang B., Daelemans W. ACL, 2014. pp. 1746–1751.
15. Lai S. et al. Recurrent Convolutional Neural Networks for Text Classification // Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence, January 25-30, 2015, Austin, Texas, USA / ed. Bonet B., Koenig S. AAAI Press, 2015. pp. 2267–2273.
16. Devlin J. et al. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, NAACL-HLT 2019, Minneapolis, MN, USA, June 2-7, 2019, Volume 1 (Long and Short Papers) / ed. Burstein J., Doran C., Solorio T. Association for Computational Linguistics, 2019. pp. 4171–4186.
17. Raffel C. et al. Exploring the Limits of Transfer Learning with a Unified Text-to-Text Transformer // J. Mach. Learn. Res. 2020. T. 21. pp. 140:1–140:67.
18. Brown T. B. et al. Language Models are Few-Shot Learners // Advances in Neural Information Processing Systems 33: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2020, NeurIPS 2020, December 6-12, 2020, virtual / ed. Larochelle H. et al. 2020.
19. Sanh V. et al. Multitask Prompted Training Enables Zero-Shot Task Generalization // The Tenth International Conference on Learning Representations, ICLR 2022, Virtual Event, April 25-29, 2022. OpenReview.net, 2022.
20. Liu P. et al. Pre-train, Prompt, and Predict: A Systematic Survey of Prompting Methods in Natural Language Processing // CoRR. 2021. T. abs/2107.13586.
21. Wei J. et al. Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models // Advances in Neural Information Processing Systems 35: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2022, NeurIPS 2022, New Orleans, LA, USA, November 28 - December 9, 2022 / ed. Koyejo S. et al. 2022.
22. Wang X. et al. Self-Consistency Improves Chain of Thought Reasoning in Language Models // The Eleventh International Conference on Learning Representations, ICLR 2023, Kigali, Rwanda, May 1-5, 2023. OpenReview.net, 2023.
23. Lewis P. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // Advances in Neural Information Processing Systems 33: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2020, NeurIPS 2020, December 6-12, 2020, virtual / ed. Larochelle H. et al. 2020
24. Wang Y. et al. Self-Instruct: Aligning Language Models with Self-Generated Instructions // Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers), ACL 2023, Toronto, Canada, July 9-14, 2023 / под ред. Rogers A.,

- Boyd-Graber J. L., Okazaki N. Association for Computational Linguistics, 2023. pp. 13484–13508.
25. Hsieh C.-Y. et al. Distilling Step-by-Step! Outperforming Larger Language Models with Less Training Data and Smaller Model Sizes // Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2023, Toronto, Canada, July 9-14, 2023 / под ред. Rogers A., Boyd-Graber J. L., Okazaki N. Association for Computational Linguistics, 2023. pp. 8003–8017.
26. Wang C., He X., Zhou A. A Short Survey on Taxonomy Learning from Text Corpora: Issues, Resources and Recent Advances // Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2017, Copenhagen, Denmark, September 9-11, 2017 / под ред. Palmer M., Hwa R., Riedel S. Association for Computational Linguistics, 2017. pp. 1190–1203.
-



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 681.5.015:53.088:004.65

ПРОБЛЕМА КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ В НЕКОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ СОГЛАСОВАНИЯ ДАННЫХ

¹ Олимпиев С.А., ²Неклюдов А.В.

ФГБОУ ВО "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МЭИ", Москва, Россия (111250, город Москва, Красноказарменная ул. д. 14 стр. 1), e-mail: ¹

¹OlimpiyevSA@mpei.ru, ²NekliudovAIV@mpei.ru

Цель: выявить и проанализировать эффект неявной компенсации погрешностей (перераспределения невязок) в модели контура конденсатора турбины ТЭС при решении задачи согласования данных (Data Reconciliation) в условиях высокой размерности модели и малого числа фактических измерений. **Методы:** структурный анализ модели на глобальную идентифицируемость и оцениваемость; статистический анализ суммарного небаланса системы (критерий 2σ). **Результаты:** выдвинута и обоснована гипотеза о неявной компенсации погрешностей алгоритмом в неконтролируемые (ненаблюдаемые) параметры, что сохраняет формальный баланс, но нарушает физическую достоверность. При малых возмущениях измеряемых параметров неконтролируемые переменные могут получать нефизические изменения. **Выводы исследования:** Формальная сходимость задачи согласования данных не гарантирует физической достоверности отдельных компонентов модели при недостаточной измерительной базе. Избыточная параметрическая гибкость модели приводит к тому, что алгоритм использует неконтролируемые параметры в качестве «демпферов» ошибок, что неприемлемо для последующей оптимизации режимов ТЭС. Решение проблемы лежит в плоскости: добавления уравнений-ограничений, расширения измерительной базы (прямые измерения параметров пара в регенеративные отборы и уровня конденсата), либо применения методов стохастической фильтрации (фильтр Калмана) с явным учетом ковариационных матриц ошибок, либо введения априорных физических ограничений.

Ключевые слова: Согласование данных, конденсатор турбины, идентифицируемость модели, компенсация погрешностей, избыточная параметрическая гибкость, автоматизация калибровки.

THE PROBLEM OF COMPENSATING FOR ERRORS IN UNCONTROLLED PARAMETERS WHEN SOLVING THE DATA COORDINATION PROBLEM

¹ Olimpiyev S.A., ²Neklyudov A.V.

"NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY "MPEI", Moscow, Russia (111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14 bldg. 1), e-mail: ¹OlimpiyevSA@mpei.ru, ²NekliudovAIV@mpei.ru

Purpose: to identify and analyze the effect of implicit error compensation (redistribution of inconsistencies) in the model of the turbine condenser circuit when solving the problem of data Reconciliation in conditions of high model dimensionality and a small number of actual measurements. **Methods:** structural analysis of the model for global identifiability and estimability; statistical analysis of the total imbalance of the system (2σ criterion). **Results:** a hypothesis is put forward and substantiated about implicit compensation of errors by the algorithm in uncontrolled (unobservable) parameters, which preserves the formal balance, but violates the physical validity. With small perturbations of the measured parameters, uncontrolled variables can receive non-physical changes. **Conclusions of the study:** the formal convergence of the data matching problem does not guarantee the physical validity of individual model components in the case of an insufficient measurement base. Excessive parametric flexibility of the model leads to the fact that the algorithm uses uncontrolled parameters as "error dampeners", which is unacceptable for subsequent optimization of TPP modes. The solution to the problem lies in the plane: adding constraint equations, expanding the measurement base (direct measurements of steam parameters in

regenerative taps and condensate level), or applying stochastic filtering methods (Kalman filter) with explicit consideration of error covariance matrices, or introducing a priori physical constraints.

Keywords: Data reconciliation, turbine condenser, model identification, error compensation, excessive parametric flexibility, calibration automation, and thermal power plants.

Для того, чтобы иметь возможность контролировать, оценивать и оптимизировать технологические процессы ТЭС, важно получить полноценную информацию об их текущем состоянии. Состояние технологического контура возможно описать математической моделью с соответствующими параметрами. [1] Такая модель обязательно будет содержать уравнения баланса массы и энергии.

При рассмотрении полного технологического контура конденсатора выделяются процессы, происходящие на встроенном пучке и на основной поверхности конденсатора. Встроенный пучок используется для предварительного подогрева обратной сетевой воды перед её подачей в основные сетевые подогреватели. [2] Это позволяет утилизировать тепло отработавшего пара, которое иначе терялось бы в конденсаторе.

Модель контура конденсатора характеризуется набором параметров, представленных в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры контура конденсатора

Параметр	Описание	Классификация
$Q_{\text{кон общ}}$	Общая тепловая нагрузка на контур конденсатора	Не измеряемый Определяемый
$Q_{\text{кон лев. ч}}$	Тепловая нагрузка левой части ЦНД на конденсатор	Не измеряемый Определяемый
$Q_{\text{кон прав. ч}}$	Тепловая нагрузка правой части ЦНД на конденсатор	Не измеряемый Определяемый
$t_{\text{ЦНД лев. ч}}$	Температура пара отбора левой части ЦНД	Измеряемый Избыточная
$t_{\text{ЦНД прав. ч}}$	Температура пара отбора правой части ЦНД	Измеряемый Избыточная
P_2	Давление отработавшего пара	Измеряемый Избыточная
$D_{\text{ЦНД лев. ч}}$	Расход пара отбора левой части ЦНД	Не измеряемый Определяемый
$D_{\text{ЦНД прав. ч}}$	Расход пара отбора правой части ЦНД	Не измеряемый Определяемый
$Q_{\text{встр п}}$	Тепловая нагрузка на встроенный пучок	Не измеряемый Определяемый
$t_{\text{встр п вых}}$	Температура охлаждающей воды на выходе из встроенного пучка	Измеряемый Избыточная
$t_{\text{встр п вх}}$	Температура сетевой воды на входе в встроенный пучок	Измеряемый Избыточная
$G_{\text{встр п}}$	Расход сетевой воды на встроенном пучке	Не измеряемый Определяемый
$D_{\text{встр п}}$	Расход пара на встроенный пучок	Не измеряемый

		Определяемый
$W_{\text{ов общ.}}$	Общий расход охлаждающей воды	Не измеряемый Определяемый
$W_{\text{ов лев. ч}}$	Расход охлаждающей воды на левую часть	Не измеряемый Определяемый
$W_{\text{ов прав. ч}}$	Расход охлаждающей воды на правую часть	Не измеряемый Определяемый
$t_{\text{ов вых лев. ч}}$	Температура охлаждающей воды на выходе левой части	Не измеряемый Определяемый
$t_{\text{ов вх лев. ч}}$	Температура охлаждающей воды на входе левой части	Не измеряемый Определяемый
$t_{\text{ов вых прав. ч}}$	Температура охлаждающей воды на выходе правой части	Не измеряемый Определяемый
$t_{\text{ов вх прав. ч}}$	Температура охлаждающей воды на входе правой части	Не измеряемый Определяемый
$D_{\text{ок}}$	Расход основного конденсата после смешения	Не измеряемый Определяемый
$t_{\text{ок}}$	Температура основного конденсата после смешения	Не измеряемый Определяемый
Stage1	Дискретное состояние одноступенчатого режима работы турбины	Не измеряемый Определяемый
Stage2	Дискретное состояние двухступенчатого режима работы турбины	Не измеряемый Определяемый
StageK	Дискретное состояние конденсационного режима работы турбины	Не измеряемый Определяемый

Набор параметров контура конденсатора разделяется на группу из 5 измеряемых и 20 не измеряемых параметров. Для определения не измеряемых параметров и согласования измеряемых параметров в модель вводились соответствующие балансовые уравнения.

Для модели конденсатора проводился анализ структурной связанности параметров и уравнений. Контур конденсатора отличается большим количеством уравнений и параметров. Это является следствием небольшого количество измеримых параметров. Система контура конденсатора является структурно связанной, так как все параметры участвуют хотя бы в одном уравнении. [3] Каждый не измеряемый параметр может быть определен через уравнение, тем самым система является идентифицируемой.

Модель конденсатора характеризуется 23 параметрами, которые подлежат оценке. При формировании матрицы Якоби системы, ранг матрицы составляет 9 – количество балансовых уравнений системы. [4] Количество оценимых параметров выше, чем ранг матрицы, что говорит о неопределенности системы. Однако работоспособность модели контура конденсатора обеспечивается дополнительными физическими ограничениями, которые характеризуются активными неравенствами с учетом категориального выбора режима работы турбины. Таким образом модель контура конденсатора является глобально оценимой, структурно связанной и идентифицируемой.[5]

При решении задачи согласования данных для контура конденсатора, модель демонстрирует суммарный небаланс системы, который составляет 0 сигм.



Рисунок 1 – Суммарный небаланс системы контура конденсатора

Исходя из этого, на первый взгляд, представленная модель свидетельствует о высокой точности решения. Однако, выдвигается гипотеза что, этот результат достигается за счет крайне ограниченного набора измеряемых параметров. В соответствии с Таблицей 1, по контуру конденсатора присутствует 5 измеряемых параметров: температуры пара левого и правого отборов из ЦНД, давление пара в отборах и температуры сетевой воды на входе и выходе из встроенного пучка.

По диаграммам рассеивания исходных параметров, представленным на Рисунке 2, наблюдается отсутствие явных систематических смещений или выбросов.

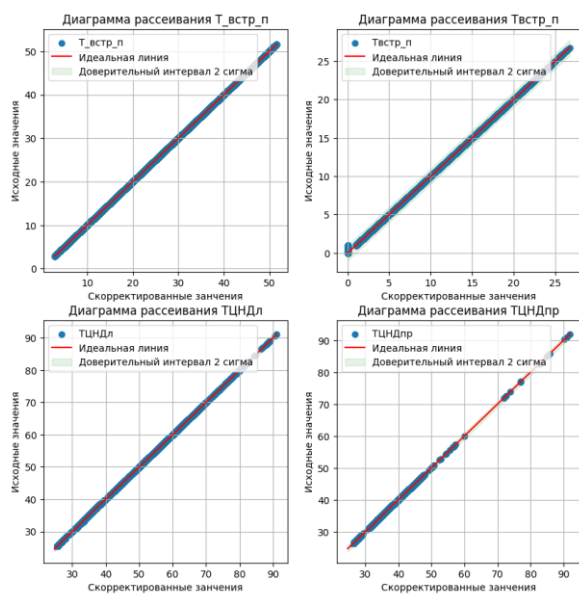


Рис. 2 – Диаграммы рассеивания исходных параметров

Значения измеримых параметров максимально близки к идеальной линии и лежат в области доверительного интервала. Поскольку у модели присутствует высокая размерность, выраженная большим количеством уравнений, и модель работает с малым количеством измеримых или рассчитанных параметров, это может приводить к неявной компенсации погрешностей в не измеряемые параметры. Система достигает формального баланса, но за счет нарушения физической достоверности отдельных параметров модели.

Алгоритм согласования данных может перераспределять ошибки в неконтролируемые параметры, тем самым, система становится чрезмерно гибкой. Малые изменения в измеряемых параметрах могут вызывать нефизичные изменения в не измеряемых параметрах.

Для решения этой проблемы стоит увеличить количество измерений, если это возможно. Помимо этого, могут использоваться методы стохастической фильтрации, а именно Калмановский фильтр для учета динамики ошибок, метод максимального правдоподобия для весовой обработки данных. Также необходимо проводить анализ чувствительности, тем самым выявить параметры, наиболее подверженные компенсации погрешностей и оценить доверительные интервалы для не измеряемых переменных.

Однако при введении дополнительных уравнений-ограничений, основанных на результатах опытной эксплуатации турбины, возможно добиться корректного результата решения задачи согласования данных для контура конденсатора, представленного на Рисунке 3.



Рисунок 3 – Суммарный небаланс системы контура конденсатора

Таким образом, несмотря на формальную корректность модели, ее практическая применимость может быть ограничена недостаточностью измерений, что приводит к компенсации погрешностей в не измеряемые параметры. Для обеспечения достоверности согласования данных требуется добавление уравнений-ограничений, расширение измерительной базы для обеспечения физической достоверности или применение методов, учитывающих в явном виде неопределенность. Данная проблема является распространенной для систем с высокой степенью параметрической неопределенности.

Список литературы

1. Алексеюк В. Э. Комплексная методика идентификации параметров математических моделей, оценивания состояния и оптимизации режимов работы сложных теплоэнергетических установок. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. И. 2021. – 158с.
2. Ледуховский Г. В. Разработка и апробация метода идентификации математических моделей конденсаторов паровых турбин по малой выработке экспериментальных данных // Вестник ИГЭУ. – 2017. С.5-10.
3. Неклюдов А. В. Оптимизация режимов работы ТЭС для различных горизонтов планирования: от нескольких часов до нескольких суток. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 2022. – 123 с.
4. Цзяньси Хань Ю. Обнаружение грубых ошибок при измерениях в паровых турбинах на основе согласования данных с учетом ограничений неравенства / Ю Цзяньси, Хань Вэньцюань, Чэнь Кан, Лю Пэй, Ли Чжэн // Журнал Энергия. – 2022. С. 253.

5. Шивэй Го. Обработка данных тепловых электростанций на основе динамического согласования данных / Го Шивей, Лю Пэй, Ли Чжэн // Semantic Scholar. – 2020.

References

1. Alekseyuk, V. E. Comprehensive Method for Identifying Parameters of Mathematical Models, Assessing Conditions, and Optimizing Operational Modes of Complex Thermal Power Installations. Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences. I. 2021. – p.158.
 2. Ledukhovskiy, G. V. Development and Testing of a Method for Identifying Mathematical Models of Steam Turbine Condensers Based on Limited Experimental Data // Bulletin of the IGEU. – 2017. pp. 5-10.
 3. Neklyudov, A. V. Optimization of Thermal Power Plant Operational Modes for Various Planning Horizons: From Several Hours to Several Days. Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: 2022. – p.123.
 4. Jiangxi, Han Yu. Detection of Gross Errors in Measurements of Steam Turbines Based on Data Reconciliation with Inequality Constraints / Yu Jiangxi, Han Wenquan, Chen Kang, Liu Pei, Li Zheng // Energy Journal. – 2022. p. 253.
 5. Shiwei, Guo. Data Processing of Thermal Power Plants Based on Dynamic Data Reconciliation / Guo Shiwei, Liu Pei, Li Zheng // Semantic Scholar. – 2020.
-



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.722:004.728:004.052:004.94

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯМИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОТОКОЛА QUIC

Дабеза И.И.

ФГАОУ ВО "САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ", Санкт-Петербург, Россия (190000, город Санкт-Петербург, Большая Морская ул., д.67 лит. а), e-mail: igorekdabezha@gmail.com

В статье рассматривается экспериментальное исследование влияния параметров управления подтверждениями (АСК) протокола QUIC на производительность передачи данных. Для изучения механизма был выбран браузер Chromium с открытым исходным кодом. Модифицированы три ключевые константы, управляющие стратегией отправки АСК-пакетов, и проведено сравнительное тестирование двух сборок. Полученные результаты показали, что консервативная политика подтверждений позволяет сократить время загрузки на 4,6% и увеличить среднюю скорость передачи данных с 9,54 до 9,99 Мбит/с, что подтверждает перспективность адаптивной настройки параметров АСК для различных условий сетевого взаимодействия.

Ключевые слова: QUIC, АСК, протокол передачи данных, управление перегрузкой, Chromium, производительность сети, беспроводные сети.

STUDY OF ACKNOWLEDGMENT MANAGEMENT PARAMETERS IMPACT ON QUIC PROTOCOL PERFORMANCE

Dabezha I.I.

ST. PETERSBURG STATE UNIVERSITY OF AEROSPACE INSTRUMENTATION, St. Petersburg, Russia (190000, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67 lit. a), e-mail: igorekdabezha@gmail.com

The article presents an experimental study of the impact of acknowledgment (ACK) management parameters in the QUIC protocol on data transfer performance. The open-source Chromium browser was selected as the research platform. Three key constants controlling the ACK sending strategy were modified, and a comparative test of two builds was conducted. The results show that a conservative acknowledgment policy reduces the transfer time by 4.6% and increases the average throughput from 9.54 to 9.99 Mbps, confirming the potential of adaptive ACK parameter tuning for various network conditions.

Keywords: QUIC, ACK, transport protocol, congestion control, Chromium, network performance, wireless networks.

Введение

Современные веб-приложения и облачные сервисы предъявляют всё более высокие требования к скорости, надёжности и отзывчивости сетевого взаимодействия. На протяжении десятилетий основой транспортного уровня Интернета являлся протокол TCP, разработанный в 1981 году. Несмотря на многочисленные доработки, TCP сохраняет ряд фундаментальных ограничений: многоэтапное установление соединения, проблема блокировки при мультиплексировании потоков (head-of-line blocking), а также невозможность модификации поведения протокола без изменения ядра операционной системы.

Стремление преодолеть эти ограничения привело к разработке протокола QUIC (Quick UDP Internet Connections), первоначально созданного инженерами Google в 2012 году и впоследствии стандартизированного рабочей группой IETF. QUIC представляет собой транспортный протокол нового поколения, работающий поверх UDP и интегрирующий функции, ранее разнесённые между TCP, TLS и HTTP/2. Именно QUIC стал транспортной основой для протокола HTTP/3, поддерживаемого большинством современных браузеров [1].

В работе [2] экспериментально показано, что стандартная реализация QUIC в браузере Chromium демонстрирует субоптимальную производительность в беспроводных сетях. Авторы установили, что механизм пакетного расписания (packet pacing) и частая отправка ACK препятствуют использованию агрегирования кадров на уровне MAC стандарта IEEE 802.11, и предложили модифицированную версию BQUIC с увеличенной пакетной пульсацией, обеспечивающую прирост пропускной способности на 20–30%. Настоящая статья развивает это направление, концентрируясь на исследовании конкретных параметров управления ACK в реализации QUIC браузера Chromium и оценке их влияния на производительность.

1. Механизм управления подтверждениями в протоколе QUIC

Протокол QUIC использует механизм подтверждений (ACK) для обеспечения надёжной доставки пакетов. В реализации Chromium поведение ACK-подсистемы определяется набором ключевых констант, сосредоточенных в заголовочном файле `quic_constants.h`. Модуль `QuicReceivedPacketManager` принимает решения об отправке ACK-фреймов на основе этих констант [4].

По умолчанию в реализации используются следующие значения констант:

- `kDefaultRetransmittablePacketsBeforeAck` = 2 — количество пакетов, требующих подтверждения, после получения которых отправляется ACK. Значение 2 соответствует рекомендации RFC 9000 и аналогично механизму `delayed ACK` в TCP [3].
- `kMaxRetransmittablePacketsBeforeAck` = 10 — верхняя граница количества пакетов без ACK. Обеспечивает своевременное информирование отправителя и предотвращает ложное обнаружение потерь.
- `kMinReceivedBeforeAckDecimation` = 100 — минимальное количество полученных пакетов до активации механизма «разрежения» ACK. На этапе медленного старта ACK отправляются с полной частотой для корректного определения пропускной способности канала [3].

Стандартные значения представляют собой эмпирически подобранный компромисс между минимизацией служебного трафика и обеспечением своевременной обратной связи. Они оптимизированы для среднестатистических условий сети, однако являются статическими и не адаптируются к конкретным условиям соединения, что создаёт потенциал для оптимизации.

2. Методология эксперимента

Для исследования была выбрана реализация QUIC в браузере Chromium по следующим причинам: открытый исходный код с возможностью глубокой модификации; использование в реальном интернет-трафике браузерами Chrome и Microsoft Edge; развитая инфраструктура

для автоматизации через Selenium WebDriver. В качестве операционной системы выбрана Ubuntu 22.04 LTS (x86_64) как официально поддерживаемая платформа сборки Chromium [4].

В рамках исследования значения констант были изменены следующим образом: `kDefaultRetransmittablePacketsBeforeAck` = 10, `kMaxRetransmittablePacketsBeforeAck` = 10, `kMinReceivedBeforeAckDecimation` = 0. Установка `kDefaultRetransmittablePacketsBeforeAck` = 10 означает, что подтверждение отправляется только после накопления десяти пакетов, что представляет собой пятикратное снижение частоты ACK по сравнению со стандартной конфигурацией. Совпадение значений двух первых констант обеспечивает единообразное поведение системы на протяжении всего соединения. Установка `kMinReceivedBeforeAckDecimation` = 0 активирует механизм «разрежения» немедленно, с первого пакета, без ожидания завершения медленного старта.

Для обеспечения корректности сравнения были подготовлены две независимые сборки Chromium с идентичными параметрами конфигурации GN и одной версией компилятора Clang. Единственным различием являлись значения трёх констант управления ACK, что полностью изолировало эффект изменения политики подтверждений от всех прочих факторов. Сборочная конфигурация: `is_debug` = false, `is_component_build` = false, `is_clang` = true, `use_thin_lto` = true, `symbol_level` = 0.

Тестирование выполнялось с использованием автоматизированного набора скриптов на базе Selenium WebDriver. Обе сборки браузера многократно загружали тестовые веб-страницы, фиксируя время загрузки и скорость передачи данных. По результатам тестирования рассчитывались средние значения и доверительные интервалы.

3. Результаты и их анализ

По результатам автоматизированного тестирования получены данные, представленные в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение параметров и результатов тестирования

Параметр	Стандартный QUIC	Модифицированный QUIC
<code>kDefaultRetransmittablePacketsBeforeAck</code>	2	10
<code>kMaxRetransmittablePacketsBeforeAck</code>	10	10
<code>kMinReceivedBeforeAckDecimation</code>	100	0
Среднее время загрузки	~83 с	~79 с (–4,6%)
Средняя скорость (Мбит/с)	9,54	9,99 (+4,7%)

Модифицированная сборка с консервативной политикой ACK продемонстрировала улучшение производительности: среднее время загрузки файла сократилось на 3,84 секунды (4,6%), а средняя скорость передачи данных возросла с 9,54 до 9,99 Мбит/с (+4,7%).

Полученный эффект обусловлен несколькими взаимосвязанными факторами. Во-первых, происходит снижение конкуренции за пропускную способность обратного канала. При стандартной политике ACK клиент генерирует значительный объём служебного трафика в направлении от клиента к серверу. В условиях типичного асимметричного интернет-соединения частые ACK-пакеты насыщают узкий обратный канал, создавая очереди и

задержки, которые влияют на скорость отправки данных сервером. При политике АСК каждые 10 пакетов объём служебного трафика сокращается в пять раз.

Во-вторых, снижается вычислительная нагрузка на сервер. Каждый АСК требует дешифрования (QUIC шифрует все данные с использованием TLS 1.3), парсинга АСК-фреймов, обновления состояния соединения и пересчёта окна перегрузки. При интенсивной передаче данных сервер может получать сотни АСК в секунду. Сокращение их количества в пять раз пропорционально снижает вычислительную нагрузку на QUIC-стек.

В-третьих, повышается стабильность планирования отправки пакетов. Редкие АСК снижают частоту перепланирований очереди отправки на сервере, делая процесс передачи более предсказуемым и снижая микрзадержки.

Полученные результаты согласуются с выводами работы [2], где было показано, что увеличение пакетной пульсации QUIC за счёт реже отправляемых подтверждений позволяет протоколу лучше использовать механизмы агрегирования на уровне МАС и достигать прироста пропускной способности до 20–30% в беспроводных сетях. Настоящее исследование подтверждает, что аналогичный эффект (порядка 4–5%) наблюдается и в проводных условиях. Разница в величине прироста объясняется тем, что в проводных сетях агрегирование кадров на уровне МАС отсутствует, и единственными факторами улучшения остаются снижение служебного трафика и вычислительной нагрузки.

Заключение

В ходе работы проведено экспериментальное исследование влияния параметров управления подтверждениями в протоколе QUIC на производительность передачи данных. Подготовлена контролируемая экспериментальная среда на базе Ubuntu 22.04 LTS, выполнена сборка браузера Chromium с оптимизированной конфигурацией. Идентифицированы три ключевые константы в файле `quic_constants.h`, управляющие политикой отправки АСК, и разработана экспериментальная конфигурация с консервативной политикой подтверждений.

Сравнительное тестирование двух идентичных сборок, различающихся исключительно значениями констант управления АСК, показало: снижение частоты подтверждений с 1 АСК на 2 пакета до 1 АСК на 10 пакетов с немедленной активацией механизма «разрежения» обеспечивает сокращение времени загрузки на 4,6% и прирост средней скорости передачи данных на 4,7% (с 9,54 до 9,99 Мбит/с). Результаты подтверждают перспективность адаптивной настройки параметров АСК и согласуются с опубликованными данными о влиянии пакетной пульсации QUIC на его производительность в WiFi-сетях [2].

Направлениями дальнейших исследований являются: оценка влияния модифицированных параметров в условиях высокой задержки и потерь пакетов; разработка механизмов динамической адаптации политики АСК к текущим характеристикам канала; проверка результатов в беспроводных сетях с агрегированием кадров 802.11.

Список литературы

1. Cloudflare Team. HTTP/3: The Past, Present, and Future [Электронный ресурс]. – URL: <https://blog.cloudflare.com/http3-the-past-present-and-future/> (дата обращения: 02.02.2026).
2. Manzoor J., Cerda-Alabern L., Sadre R., Drago I. Improving Performance of QUIC in WiFi // IEEE. – 2019. – С. 1–6.

3. IETF. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport (RFC 9000) [Электронный ресурс]. – URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9000> (дата обращения: 08.02.2026).
4. The Chromium Projects. QUIC, a multiplexed transport over UDP [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.chromium.org/quic/> (дата обращения: 24.02.2026).
5. Chromium Project. Chromium Documentation: Network Stack and QUIC [Электронный ресурс]. – URL: <https://source.chromium.org/chromium/chromium/src/+/main:net/> (дата обращения: 12.02.2026).
6. Habr. HTTP/3 и QUIC: как устроен новый протокол / А. Петров [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/articles/719598/> (дата обращения: 02.03.2026).

References

1. Cloudflare Team. HTTP/3: The Past, Present, and Future [Electronic resource]. – URL: <https://blog.cloudflare.com/http3-the-past-present-and-future/> (accessed: 02.02.2026).
 2. Manzoor J., Cerda-Alabern L., Sadre R., Drago I. Improving Performance of QUIC in WiFi // IEEE. – 2019. – pp. 1–6.
 3. IETF. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport (RFC 9000) [Electronic resource]. – URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9000> (accessed: 08.02.2026).
 4. The Chromium Projects. QUIC, a multiplexed transport over UDP [Electronic resource]. – URL: <https://www.chromium.org/quic/> (accessed: 24.02.2026).
 5. Chromium Project. Chromium Documentation: Network Stack and QUIC [Electronic resource]. – URL: <https://source.chromium.org/chromium/chromium/src/+/main:net/> (accessed: 12.02.2026).
 6. Habr. HTTP/3 and QUIC: how the new protocol works / A. Petrov [Electronic resource]. – URL: <https://habr.com/ru/articles/719598/> (accessed: 02.03.2026).
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.031.4:629.78

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ И ПРИЁМА ВИДЕОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ВИДЕОКОНТРОЛЯ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Набатов Н.Н.

*ФГБОУ ВО "МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)" (ФИЛИАЛ "ВОСХОД" В Г.БАЙКОНУРЕ),
Байконур, Россия (468325, город Байконур, ул Гагарина, д. 5), e-mail: mai@nabatovnn.ru*

В статье проведён системный анализ процессов передачи и приёма видеотелеметрической информации (ВТИ) бортовой системы видеоконтроля (БСВК) ракеты-носителя. Рассмотрены состав и функциональные особенности БСВК как источника видеотелеметрических данных, специфика передачи видеoinформации в составе единого телеметрического потока, а также факторы деградации качества ВТИ, классифицированные по группам бортовых, канальных и наземных воздействий. Процесс передачи и приёма ВТИ формализован как система, включающая восемь функциональных элементов; разработана структурно-функциональная модель, выделяющая пять стадий преобразования информации с идентификацией характерных точек возникновения потерь, ошибок и неопределённости. Показано, что стандартные метрики качества канала связи недостаточны для оценки качества видеотелеметрической информации вследствие межкадровой зависимости сжатого видеопотока и нестационарного характера деградации. Проанализированы проблемные аспекты многопозиционного приёма ВТИ, включая пространственно-временную неоднородность качества потоков и трудности формализованного выбора результирующего видеопотока. На основании результатов анализа сформулирована научная задача разработки методов безэталонной оценки качества ВТИ и алгоритма динамического выбора видеопотока в условиях многопозиционного приёма.

Ключевые слова: БСВК, ракета-носитель, многопозиционный приём, видеотелеметрическая информация, системный анализ, динамический выбор видеопотока, безэталонная оценка качества, качество видеопотока.

SYSTEM ANALYSIS OF PROCESSES OF TRANSMISSION AND RECEPTION OF VIDEO TELEMTRY INFORMATION OF THE ONBOARD VIDEO MONITORING SYSTEM OF LAUNCH VEHICLES

Nabatov N.N.

*"MOSCOW AVIATION INSTITUTE (NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY)" (BRANCH
"VOSKHOD" IN BAIKONUR), Baikonur, Russia (468325, Baikonur, Gagarina str., 5), e-mail:
mai@nabatovnn.ru*

The article presents a systematic analysis of the transmission and reception processes of video telemetry information (VTI) within the onboard video monitoring system (OVMS) of a launch vehicle. The composition and functional characteristics of the OVMS as a source of video telemetry data are examined, alongside the specifics of transmitting video information as part of a unified telemetry stream. Factors affecting VTI quality degradation are classified into groups based on onboard, channel, and ground-based impacts.

The VTI transmission and reception process is formalized as a system comprising eight functional elements. A structural-functional model has been developed, identifying five stages of information transformation and pinpointing specific locations where losses, errors, and uncertainty occur. It is demonstrated that standard communication channel quality metrics are insufficient for evaluating VTI quality due to the inter-frame dependency of compressed video streams and the non-stationary nature of degradation.

The study analyzes the challenges of multi-station VTI reception, including the spatial-temporal heterogeneity of stream quality and the difficulties of formalized selection for the resultant video stream. Based on

the analysis results, a scientific objective is formulated: the development of no-reference quality assessment methods for VTI and a dynamic video stream selection algorithm for multi-station reception environments.

Keywords: OVMS, launch vehicle, multi-station reception, video telemetry information, systems analysis, dynamic video stream selection, no-reference quality assessment, video stream quality.

Введение

Развитие ракетно-космической техники предъявляет возрастающие требования к составу и качеству телеметрической информации, получаемой в ходе лётных испытаний ракет-носителей. Одним из информативных каналов контроля является бортовая система видеоконтроля (БСВК), обеспечивающая получение видеоданных о состоянии конструктивных элементов, работе двигательных установок и динамике полёта. Видеоинформация, передаваемая в составе телеметрического потока, позволяет проводить визуальный анализ нештатных ситуаций, верифицировать данные датчиковой телеметрии и восстанавливать картину событий при аномальном функционировании изделия [6].

Вместе с тем передача видеотелеметрической информации (ВТИ) сопряжена с рядом существенных трудностей. Радиоканал «борт – земля» в условиях активного полёта подвержен воздействию широкого спектра помех: атмосферных, интерференционных, обусловленных плазменными образованиями в зоне работы двигателей, а также геометрическими ограничениями зон радиовидимости наземных приёмных пунктов. Следствием этого являются потери пакетов данных, битовые ошибки, кратковременные прерывания потока и неравномерность качества принимаемого видеосигнала. Перечисленные явления носят нестационарный характер и не поддаются полному устранению средствами помехозащищённого кодирования в рамках существующих ограничений на пропускную способность бортового передатчика [10, 18].

Для повышения полноты и достоверности принимаемой ВТИ применяется многопозиционный приём – одновременный приём сигнала несколькими территориально разнесёнными наземными пунктами. При этом потоки, принятые различными пунктами, характеризуются неодинаковым качеством, различной степенью поврежденности и неодинаковой временной полнотой. Задача формирования результирующего видеопотока из совокупности разнородных входных потоков представляет собой самостоятельную научно-техническую проблему, решение которой в настоящее время не имеет формализованного и унифицированного описания в открытой технической литературе.

Анализ структуры данной проблемы свидетельствует о её системном характере: она охватывает процессы формирования информации на борту, её передачи по радиоканалу, распределённого приёма, первичной обработки и последующего выбора или синтеза результирующего потока. Каждый из перечисленных процессов вносит собственный вклад в итоговое качество видеоданных, а взаимодействие между ними определяется сложными причинно-следственными связями, зависящими от условий конкретного полёта. В этой связи системный анализ процессов передачи и приёма ВТИ является необходимым предварительным этапом для корректной постановки задачи разработки методов оценки качества и интеллектуального выбора видеопотока.

Целью настоящей статьи является проведение системного анализа процессов передачи и приёма видеотелеметрической информации бортовой системы видеоконтроля ракеты-носителя, выявление состава и структуры элементов соответствующей информационной системы, классификация факторов деградации качества видеоданных и обоснование

постановки научной задачи интеллектуальной обработки ВТИ в условиях многопозиционного приёма. В статье последовательно рассматриваются: характеристика объекта исследования и особенностей передачи ВТИ; структурно-функциональный анализ информационного канала; проблемные аспекты обработки видеотелеметрических данных; постановка задачи дальнейших исследований.

1. Характеристика объекта исследования и особенностей передачи видеотелеметрической информации

Бортовая система видеоконтроля ракеты-носителя представляет собой аппаратно-программный комплекс, предназначенный для получения, первичной обработки и передачи видеоданных о состоянии контролируемых зон изделия в процессе лётных испытаний [1]. В состав БСВК, как правило, входят: бортовые видеокамеры, устанавливаемые в зонах контроля двигательных установок, разделяющихся ступеней и элементов конструкции; блоки оцифровки и компрессии видеосигнала; блок мультиплексирования видеоданных с общим потоком телеметрической информации; бортовой передатчик телеметрической системы [3].

Видеокамеры БСВК функционируют в условиях воздействия вибраций, акустических нагрузок, температурных перепадов и газодинамических потоков, характерных для активного участка полёта. Это определяет специфические требования к конструктивному исполнению аппаратуры и, как следствие, ограничения на применяемые методы сжатия видеосигнала и разрешение получаемых изображений [6 – 8].

Видеоданные, формируемые БСВК, являются составной частью общего телеметрического потока и передаются в соответствии с принятым форматом кадрирования ТМИ. Видеоинформация при этом конкурирует за пропускную способность телеметрического канала с измерительной информацией датчиковых систем, что обуславливает ограничения на битовую скорость видеопотока и, следовательно, на качество передаваемого изображения.

Передача видеотелеметрической информации осуществляется по радиоканалу «борт – земля» в составе единого цифрового потока ТМИ. Структура телеметрического кадра предусматривает выделение фиксированных или динамически распределяемых временных слотов для размещения видеоданных. Применение стандартных форматов телеметрии – в частности, форматов, регламентированных стандартами IRIG-106 и их отечественными аналогами – накладывает ограничения на способ упаковки видеоданных и допустимые алгоритмы их сжатия [2].

Использование алгоритмов компрессии видео (в частности, основанных на дискретном косинусном преобразовании или межкадровом предсказании) в условиях потерь в канале связи приводит к специфическому характеру артефактов: потеря одного пакета данных при межкадровом кодировании вызывает распространение ошибки на последующие кадры вплоть до следующего опорного кадра (I-frame). Это существенно отличает поведение видеопотока при ошибках канала от поведения дискретных измерительных данных и определяет принципиально иные требования к методам оценки качества и восстановления ВТИ.

Таким образом, ВТИ, передаваемая в составе ТМИ, характеризуется следующими специфическими свойствами:

- зависимостью качества от ограниченной пропускной способности телеметрического канала;

- чувствительностью к потерям пакетов вследствие применения алгоритмов межкадрового сжатия;
- невозможностью применения стандартных механизмов повторной передачи (ARQ) ввиду одностороннего характера канала «борт — земля» и жёстких временных ограничений;
- зависимостью интерпретируемости данных от целостности опорных кадров [11].

Качество принимаемой ВТИ определяется совокупностью факторов, которые целесообразно разделить на три группы (Таблица 1).

Таблица 1 - Классификация факторов

Группа факторов	Состав факторов	Характер влияния
Бортовые факторы	Ограничения битовой скорости; параметры алгоритма сжатия; аппаратные ограничения камер	Определяют исходное качество и структуру видеопотока
Фактора радиоканала	Атмосферные помехи; интерференция; экранирование корпусом изделия; плазменные образования; ограничения зон радиовидимости	Вызывают потери пакетов, битовые ошибки, кратковременные прерывания
Наземные факторы	Характеристики приёмной антенны; уровень собственных шумов приёмника; точность сопровождения объекта; взаимное расположение пунктов приёма	Определяют отношение сигнал/шум и полноту принятых данных

Особо следует выделить фактор плазменного экранирования, возникающего при работе маршевых двигателей: истекающие газодинамические струи образуют ионизированную область, обладающую поглощающими и рассеивающими свойствами по отношению к радиоволнам телеметрического диапазона. Данный эффект носит нестационарный характер и приводит к существенному снижению уровня принимаемого сигнала на отдельных участках траектории, не поддающемуся компенсации стандартными методами адаптивной обработки [15].

Совокупность перечисленных факторов определяет сложность задачи обработки ВТИ как системную проблему, характеризуемую следующими признаками:

Многоуровневость источников деградации. Ухудшение качества видеоданных обусловлено одновременным воздействием факторов различной природы – технических, физических и геометрических, что исключает возможность её решения методами, ориентированными на устранение единственного доминирующего фактора.

Зависимость от нестационарных условий. Параметры радиоканала, зоны радиовидимости и характер помех изменяются в процессе полёта непредсказуемым образом, что требует применения адаптивных методов оценки текущего состояния информационного потока.

Межкадровые зависимости в структуре видеоданных. Наличие временных зависимостей между кадрами сжатого видеопотока означает, что оценка качества отдельного кадра не может

быть выполнена изолированно – необходим анализ структуры потока на временном интервале.

Неоднородность входных данных при многопозиционном приёме. Наличие нескольких источников одного и того же видеопотока с различными характеристиками качества порождает задачу выбора или синтеза результирующего потока, не имеющую тривиального решения без формализованного критерия качества.

Таким образом, задача обработки ВТИ в условиях многопозиционного приёма не сводится к задаче технической фильтрации сигнала, а представляет собой информационно-управленческую задачу, требующую системного подхода к её анализу и решению.

2. Системный анализ процесса передачи и приёма видеотелеметрической информации

В рамках системного подхода процесс передачи и приёма видеотелеметрической информации рассматривается как целенаправленная совокупность взаимосвязанных элементов, функционирующих в условиях внешних воздействий и внутренних ограничений с целью обеспечения передачи видеоданных от бортового источника до наземного потребителя с заданными показателями полноты и достоверности.

Формально систему передачи ВТИ можно представить в виде:

$$S = \langle E, R, X, Y, W, C \rangle \quad (1)$$

где:

E – множество элементов системы,

R – множество отношений (связей) между элементами,

X – множество входных воздействий,

Y – множество выходных характеристик,

W – множество внешних возмущений (помех и ограничений),

C – множество ограничений на функционирование системы.

Данное представление позволяет перейти от неформального инженерного описания к структурированному анализу, пригодному для последующей формализации задач оценки и управления качеством видеопотока.

На основании проведённого анализа в составе системы передачи и приёма ВТИ выделяются следующие основные элементы (Таблица 2).

Таблица 2 - Элементы системы передачи и приема ВТИ

Обозначение	Наименование элемента	Основная функция
E_1	Бортовая система видеоконтроля (БСВК)	Формирование, оцифровка и компрессия видеоданных
E_2	Блок мультиплексирования ТМИ	Включение видеоданных в общий телеметрический поток
E_3	Бортовой передатчик ТМИ	Модуляция и передача радиосигнала
E_4	Радиоканал «борт – земля»	Распространение радиосигнала в условиях помех
E_5	Наземные приемные пункты (НПП1...НППn)	Прием, демодуляция и первичное декодирование сигнала
E_6	Блок первичной обработки ТМИ	Разбор телеметрического потока, извлечение видеоданных
E_7	Подсистема оценки и выбора видеопотока	Анализ качества потоков, формирование результирующего видео
E_8	Потребитель ВТИ	Использование видеоданных для анализа полета

Элементы $E_1 - E_3$ относятся к бортовому сегменту системы, элемент E_4 образует каналный сегмент, элементы $E_5 - E_7$ составляют наземный сегмент обработки. Элемент E_7 в существующих системах, как правило, реализован частично или отсутствует в формализованном виде, что и определяет одну из ключевых проблем, рассматриваемых в настоящей статье [9].

На Рисунке 1 представлена структурно-функциональная схема системы передачи и приема видеотелеметрической информации.

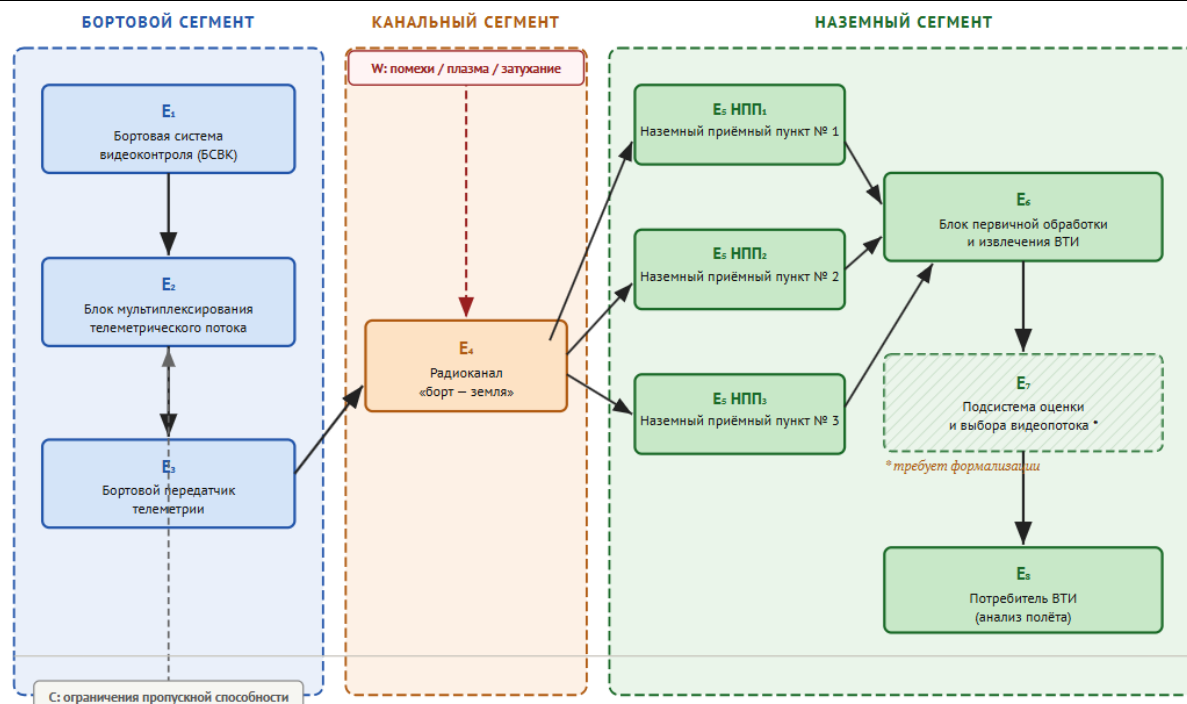


Рисунок 1 - Структурно-функциональная схема системы передачи и приёма видеотелеметрической информации (E_1 – E_8 – функциональные элементы системы; W – внешние возмущения радиоканала; C – ограничение пропускной способности; штриховой контур E_9 обозначает элемент, отсутствующий в формализованном виде в существующих наземных комплексах обработки ТМИ)

Входы, выходы и внешние воздействия описаны далее.

1. Входы системы (X):

- непрерывный видеосигнал с бортовых камер БСВК;
- параметры конфигурации телеметрической системы (формат кадра, битовая скорость, алгоритм сжатия);
- сигналы синхронизации и временные метки.

2. Выходы системы (Y):

- результирующий видеопоток, сформированный по данным одного или нескольких наземных приемных пунктов;
- метаданные качества: оценки полноты, достоверности и временной непрерывности видеоданных по каждому пункту приема;
- диагностическая информация о состоянии канала передачи.

3. Внешние возмущения (W):

- электромагнитные помехи в канале распространения;
- плазменное экранирование в зоне работы двигателей;
- изменение геометрии зон радиовидимости в ходе полета;
- нестационарность параметров атмосферного канала.

4. Ограничения:

- фиксированная пропускная способность телеметрического канала;
- односторонний характер канала «борт – земля» (отсутствие обратной связи);

- требование реального времени к обработке и доступности данных;
- аппаратные ограничения бортового сегмента.

Структурно-функциональная модель процесса передачи и приёма ВТИ описывает последовательность преобразований информации от источника до потребителя с указанием точек возникновения потерь и искажений. Модель включает пять функциональных стадий.

Стадия 1. Формирование видеотелеметрической информации (элементы E_1 , E_2). На данной стадии аналоговый видеосигнал преобразуется в цифровую форму, подвергается компрессии и упаковывается в телеметрический поток. Результирующее качество определяется параметрами кодека и выделенной долей пропускной способности канала. Потери на данной стадии носят детерминированный характер и обусловлены исключительно ограничениями на сжатие.

Стадия 2. Передача по радиоканалу (элементы E_3 , E_4). Телеметрический поток передаётся по радиоканалу, подверженному воздействию помех и затуханий. На данной стадии возникают битовые ошибки и потери пакетов. Интенсивность потерь определяется текущим значением отношения сигнал/шум (SNR) и является нестационарной функцией времени полёта. Из-за одностороннего характера канала обнаружение и исправление ошибок ограничено возможностями помехозащищённого кодирования прямого действия (FEC) [13].

Стадия 3. Прием и первичная обработка (элемент E_5). Каждый наземный приёмный пункт независимо принимает и демодулирует сигнал. Качество принятого потока определяется позицией пункта относительно траектории, характеристиками антенной системы и уровнем собственных шумов аппаратуры. Потоки, принятые различными пунктами в один и тот же момент времени, могут существенно различаться по доле повреждённых или утраченных кадров.

Стадия 4. Извлечение и декомпрессия видеоданных (элемент E_6). На данной стадии из телеметрического потока извлекаются видеоданные и выполняется их декомпрессия. Наличие ошибок, внесённых на стадии 2, проявляется здесь в виде артефактов декодирования: блочных искажений, размытия, «замораживания» кадра или полного отказа декодирования на интервале между опорными кадрами. Характер и масштаб артефактов существенно зависят от позиции ошибки относительно структуры GOP (Group of Pictures).

Стадия 5. Оценка качества и формирование результирующего потока (элемент E_7). На данной стадии должна производиться оценка качества видеопотоков, принятых каждым из наземных пунктов, и на её основе – выбор или синтез результирующего видеоряда. В существующих системах данная стадия, как правило, реализуется оператором в ручном режиме либо не реализуется вовсе, что приводит к субъективности и снижению полноты используемых данных. Формализация и автоматизация данной стадии является основной научно-технической задачей, обоснование которой составляет предмет настоящей статьи.

На основании структурно-функциональной модели идентифицированы точки возникновения основных видов деградации информации (Таблица 3).

Таблица 3 - Точки деградации информации в системе передачи и приема ВТИ.

Стадия	Вид деградации	Характер	Возможность компенсации
Стадия 1	Потеря качества при сжатии	Детерминированный	Ограничена параметрами канала
Стадия 2	Битовые ошибки, потери пакетов	Нестационарный, случайный	Частичная (FEC)
Стадия 2	Прерывания потока при плазменном экранировании	Нестационарный, прогнозируемый	Отсутствует на борту
Стадия 3	Неравномерность качества по пунктам приема	Пространственно-временной	Через выбор пункта
Стадия 4	Распространение ошибок декодирования	Структурный	Через I-frame рестарт
Стадия 5	Неопределенность при выборе результирующего потока	Информационный	Требует формализации

Принципиально важным выводом из данного анализа является то, что деградация информации происходит на нескольких стадиях независимо, а их суммарное воздействие на качество результирующего видеопотока не может быть оценено по характеристикам отдельной стадии. Это обуславливает необходимость сквозной оценки качества ВТИ – от источника до потребителя – как единого информационного процесса.

3. Проблемные аспекты обработки видеотелеметрической информации

Ошибки, возникающие в радиоканале «борт – земля», оказывают на видеотелеметрический поток воздействие, принципиально отличающееся от их влияния на дискретные измерительные данные. В случае измерительной телеметрии потеря одного кадра данных приводит к утрате значений соответствующих параметров в данный момент времени, тогда как соседние кадры остаются интерпретируемыми. В случае сжатого видеопотока ситуация качественно иная: вследствие межкадровой зависимости, присущей алгоритмам компрессии с предсказанием, ошибка, возникшая в одном пакете, распространяется на все последующие кадры группы GOP вплоть до следующего опорного кадра.

Данное явление – распространение ошибки декодирования во времени (error propagation) – определяет следующие практические последствия [5]:

- фактический объем утраченной видеоинформации превышает объем физически потерянных пакетов в канале;
- метрика потерь пакетов (Packet Loss Rate, PLR) не является достаточной характеристикой для оценки качества видеопотока;

- оценка качества ВТИ требует учёта структуры GOP и позиции ошибки относительно опорных кадров.

Таким образом, стандартные показатели качества канала связи (BER, PLR) являются необходимыми, но недостаточными характеристиками для оценки качества принимаемой видеотелеметрической информации [17].

Помимо эффекта распространения ошибки декодирования, потери данных в канале порождают ряд дополнительных проблем интерпретируемости видеоинформации.

1. Нарушение временной непрерывности потока. Прерывания радиосигнала, обусловленные плазменным экранированием или выходом объекта из зоны радиовидимости, приводят к образованию временных лакун в видеоданных. Длительность таких лакун может составлять от единиц до десятков секунд, что соответствует потере существенного фрагмента видеозаписи полёта.

2. Нарушение синхронизации декодера. При значительных потерях пакетов декодер видео может утрачивать синхронизацию с потоком, что приводит к невозможности декодирования последующих кадров даже при восстановлении качества канала. Повторная синхронизация возможна только при поступлении очередного опорного кадра.

3. Неравномерность качества внутри потока. Даже при относительно низком среднем значении PLR качество отдельных фрагментов видеопотока может существенно варьироваться: участки с высоким качеством чередуются с участками, содержащими значительные артефакты или полностью нечитаемыми. Данная неоднородность затрудняет использование интегральных метрик для оценки всего потока и требует применения методов пок кадрового или поучасткового анализа.

При многопозиционном приёме каждый наземный приёмный пункт формирует независимую копию видеотелеметрического потока. Независимость приёма означает, что потоки, полученные различными пунктами за один и тот же интервал времени, могут существенно различаться по следующим характеристикам [4,12]:

- доле поврежденных и утраченных кадров;
- наличию и длительности временных лакун;
- уровню артефактов декодирования;
- временной непрерывности и полноте видеозаписи.

Данная неоднородность носит пространственно-временной характер: пункт, обеспечивающий наилучшее качество приёма на одном участке траектории, может оказаться наихудшим на другом – вследствие изменения геометрии зон радиовидимости, взаимного затенения антенн или локальных условий распространения радиоволн. Следовательно, ни один из пунктов приёма не обеспечивает гарантированно наилучшего качества на протяжении всего полёта.

На Рисунке 2 представлена зависимость качества Q от времени на каждом из участков.

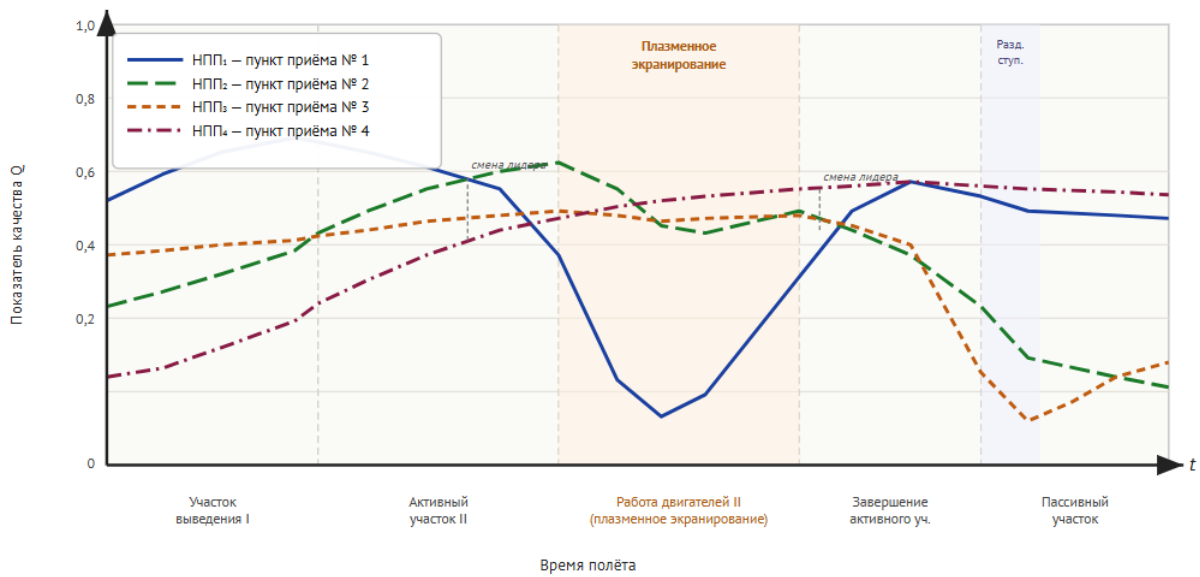


Рисунок 2 - Условный пример изменения показателя качества Q видеотелеметрических потоков, принятых четырьмя наземными пунктами (НПП₁–НПП₄), на протяжении полёта ракеты-носителя.

Рисунок 2 иллюстрирует пространственно-временную неоднородность качества и явление смены «лидирующего» источника данных в различных фазах полёта; зона плазменного экранирования и зона разделения ступеней выделены фоном.

Это обстоятельство определяет принципиальную необходимость динамического – зависящего от текущего момента времени – выбора источника видеоданных или синтеза результирующего потока из нескольких источников.

Задача выбора наилучшего видеопотока из совокупности потоков, принятых несколькими пунктами, сопряжена с рядом трудностей, носящих как методологический, так и инженерный характер [14].

1. Отсутствие эталонного сигнала. В условиях реального приёма ВТИ эталонный (неискажённый) видеосигнал недоступен для сравнения. Следовательно, классические метрики оценки качества видео, основанные на сравнении с эталоном (PSNR, SSIM), не могут быть применены непосредственно. Требуются методы безэталонной (No-Reference, NR) оценки качества видеопотока.

2. Многокритериальность оценки. Качество видеопотока является многомерной характеристикой, включающей пространственное качество изображения, временную непрерывность, полноту данных и структурную целостность потока. Свёртка этих характеристик в единый скалярный показатель требует обоснования весовых коэффициентов, зависящих от целей конкретного анализа.

3. Временная задержка оценки. Оценка качества видеопотока, принятого конкретным пунктом, может быть выполнена лишь после приёма и декодирования соответствующего фрагмента. Это вносит задержку в процесс принятия решения о выборе потока и создаёт конфликт между оперативностью и точностью оценки.

4. Неопределённость при равнозначных потоках. В ситуациях, когда несколько пунктов обеспечивают сопоставимое качество приёма, выбор между ними не может быть произведён

на основе единственного критерия. Это требует введения дополнительных правил приоритизации, в том числе с учётом прогноза изменения качества.

Практическая реализация методов оценки и выбора видеопотока в составе реальных наземных комплексов обработки ТМИ сопряжена с рядом инженерных ограничений, которые необходимо учитывать при постановке задачи [9].

1. Требования реального времени. Обработка видеотелеметрической информации в ходе лётных испытаний осуществляется в режиме, близком к реальному времени. Это накладывает жёсткие ограничения на вычислительную сложность применяемых алгоритмов оценки качества.

2. Гетерогенность аппаратного обеспечения. Наземные приёмные пункты могут быть оснащены аппаратурой различных поколений и производителей, что обуславливает неоднородность форматов выходных данных и интерфейсов взаимодействия.

3. Ограничения на передачу данных между пунктами. Пропускная способность каналов связи между территориально разнесёнными наземными пунктами может быть недостаточной для передачи полных видеопотоков в реальном времени, что ограничивает возможности централизованной обработки и требует распределённой архитектуры системы.

4. Отсутствие формализованных критериев качества ВТИ. В действующей нормативно-технической документации по телеметрическим системам критерии качества видеотелеметрической информации, как правило, не формализованы в достаточной мере, что затрудняет как проектирование систем оценки, так и верификацию их результатов.

Совокупность рассмотренных проблемных аспектов свидетельствует о том, что существующий подход к обработке ВТИ, основанный преимущественно на ручном выборе оператора, не отвечает требованиям полноты, объективности и воспроизводимости результатов. Это обосновывает необходимость разработки формализованных методов оценки качества и автоматизированного выбора видеопотока, составляющих предмет дальнейших исследований.

4. Постановка научной задачи дальнейших исследований

Проведённый системный анализ процессов передачи и приёма видеотелеметрической информации бортовой системы видеоконтроля ракеты-носителя позволяет сформулировать ряд выводов, непосредственно определяющих направление дальнейших исследований.

Вывод 1. Процесс передачи и приёма ВТИ представляет собой многостадийную систему, на каждой стадии которой происходит деградация информации различной природы и интенсивности. Деградация на отдельных стадиях независима, а суммарное воздействие на качество результирующего видеопотока не может быть охарактеризовано показателями отдельной стадии.

Вывод 2. Стандартные метрики качества канала связи (BER, PLR) и эталонные метрики качества видео (PSNR, SSIM) не применимы непосредственно для оценки качества ВТИ в условиях реального многопозиционного приёма. Требуются специализированные методы безэталонной оценки, учитывающие структурные особенности сжатого видеопотока и характер его деградации в телеметрическом канале.

Вывод 3. Качество видеопотоков, принятых различными наземными пунктами, характеризуется пространственно-временной неоднородностью, исключающей возможность однократного статического выбора наилучшего источника на весь интервал полёта.

Необходим динамический механизм оценки и выбора, функционирующий в темпе поступления данных.

Вывод 4. Элемент системы, ответственный за оценку качества и формирование результирующего видеопотока (E_7 в терминах раздела 2), в существующих наземных комплексах обработки ТМИ либо отсутствует в формализованном виде, либо реализован в ручном режиме. Это является структурной лакунной системы, устранение которой представляет самостоятельную научно-техническую задачу.

Вывод 5. Инженерные ограничения реальных систем – требования реального времени, гетерогенность аппаратного обеспечения, ограниченная пропускная способность межпунктовых каналов связи – определяют дополнительные требования к разрабатываемым методам и исключают прямое применение вычислительно-интенсивных подходов без их адаптации к условиям функционирования.

На основании изложенных выводов формулируется следующая научная задача дальнейших исследований: разработка методов формализованной оценки качества видеотелеметрической информации и автоматизированного выбора результирующего видеопотока в условиях многопозиционного приёма, удовлетворяющих требованиям безэталонности оценки, динамической адаптации к изменяющимся условиям приёма и реализуемости в условиях вычислительных и временных ограничений наземного комплекса обработки телеметрической информации ракеты-носителя.

Данная задача может быть декомпозирована на следующие частные подзадачи:

Подзадача 1. Разработка и обоснование системы показателей качества видеотелеметрической информации, учитывающей структурные особенности сжатого видеопотока, характер деградации в телеметрическом канале и требования потребителя ВТИ.

Подзадача 2. Разработка методов безэталонной оценки качества видеопотока применительно к условиям телеметрического приёма: с учётом нестационарности канала, межкадровых зависимостей и ограниченности вычислительных ресурсов.

Подзадача 3. Разработка алгоритма динамического выбора или синтеза результирующего видеопотока из совокупности потоков, принятых территориально разнесёнными наземными пунктами, на основе формализованных критериев качества.

Подзадача 4. Разработка архитектуры подсистемы оценки и выбора видеопотока (элемент E_7), обеспечивающей интеграцию в существующую структуру наземного комплекса обработки ТМИ с учётом выявленных инженерных ограничений.

Подзадача 5. Экспериментальная верификация разработанных методов на реальных или модельных данных видеотелеметрического приёма с оценкой эффективности по сформированной системе показателей качества.

Заключение

В настоящей статье проведён системный анализ процессов передачи и приёма видеотелеметрической информации бортовой системы видеоконтроля ракеты-носителя. По результатам выполненного исследования сформулированы следующие основные выводы.

1. Бортовая система видеоконтроля является специфическим источником телеметрической информации, принципиально отличающимся от датчиковых систем измерения по характеру формируемых данных, структуре потока и механизму деградации при ошибках канала связи. Передача видеоданных в составе единого телеметрического потока

сопряжена с конкуренцией за пропускную способность канала и накладывает ограничения на качество и метод сжатия видеосигнала.

2. Процесс передачи и приёма ВТИ формализован как система $S = \langle E, R, X, Y, W, C \rangle$, включающая восемь функциональных элементов, распределённых по бортовому, каналному и наземному сегментам. Структурно-функциональная модель процесса выделяет пять стадий преобразования информации, на каждой из которых идентифицированы характерные виды деградации, их природа и возможности компенсации.

3. Установлено, что деградация видеотелеметрической информации носит многоуровневый и нестационарный характер. Ключевым механизмом усиления потерь является распространение ошибки декодирования вследствие межкадровой зависимости сжатого видеопотока, вследствие чего стандартные метрики качества канала связи (BER, PLR) являются необходимыми, но недостаточными характеристиками для оценки качества принимаемой ВТИ.

4. Показано, что при многопозиционном приёме видеопотока, формируемые территориально разнесёнными наземными пунктами, характеризуются пространственно-временной неоднородностью качества. Ни один из пунктов приёма не обеспечивает гарантированно наилучшего качества на всём интервале полёта, что исключает возможность статического выбора источника данных и обуславливает необходимость динамического механизма оценки и выбора видеопотока.

5. Выявлено, что элемент системы, ответственный за формализованную оценку качества и выбор результирующего видеопотока, в существующих наземных комплексах обработки ТМИ отсутствует либо реализован в ручном режиме. Данное обстоятельство представляет собой структурную лакуну системы и является непосредственным основанием для постановки научной задачи настоящего исследования.

6. Сформулирована научная задача разработки методов формализованной безэталонной оценки качества ВТИ и алгоритма динамического выбора результирующего видеопотока в условиях многопозиционного приёма с учётом инженерных ограничений реальных наземных комплексов обработки телеметрической информации. Задача декомпозирована на пять взаимосвязанных подзадач, определяющих структуру и логику последующих публикаций диссертационного цикла.

Список литературы

1. Григорьев А. П., Любимов А. В. Обзор современных отечественных телеметрических систем изделий ракетно-космической техники. : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 2024. С. 43–47.
2. Григорьев А. П., Любимов А. В. Облик перспективных телеметрических систем изделий ракетно-космической техники. : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 2024. С. 48–56.
3. Григорьев А. П., Любимов А. В., Бурлуцкий С. Г. Бортовые телеметрические системы изделий ракетно-космической техники. : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 2024. С. 64–72.
4. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Принципы применения корректоров межсимвольных искажений в цифровых системах приёма многопозиционных сигналов. : Юго-Западный государственный университет, Курск, 2025. С. 25–31.

5. Звездочкин М.Ю., Камордин А.А., Сафронов Н.М. Быстрые алгоритмы восстановления искаженных видеокадров с использованием информационной избыточности кодека Motion JPEG // Вестник РГРТУ. 2025. Т. 91. С. 200-208.
6. Климов Д. И. Перспективы развития систем видеотелеметрии для изделий ракетно-космической техники. : МИРЭА - Российский технологический университет, 2019. С. 67–69.
7. Климов Д. И. Направление развития видеосистемы измерения физических величин в изделиях ракетно-космической промышленности как одной из разновидностей видеосистем. : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. С. 35–41.
8. Климов Д. И., Мамедов Т. Т. Системы видеотелеметрии и видеоконтроля для изделий ракетно-космической техники. : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2018. С. 27–29.
9. Комов С.Д., Писанко А.А. Применение технологии MLS-MIMO-OFDM в адаптивной системе передачи информации в стационарной среде // Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции: в 6 т. / Воронежский государственный университет; АО «Концерн «Созвездие»». – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. С. 384 – 393.
10. Матюшин М. М., Махалов Д. А. Автоматизированная обработка информации от бортовой системы видеоконтроля ракет-носителей // Пилотируемые Полеты В Космос. 2021. № 4 (41). С. 17–35.
11. Мороз А. П. Ракетная телеметрия. : Научный консультант, 123007, г. Москва, Хорошевское ш., 35к2, офис 508, Москва.
12. Першин И. М., Санкин А. В. Стенд для исследования распределенной системы передачи и приема информации в радиодиапазоне. : Южный федеральный университет, 2021. С. 359–361.
13. Родионов А.Ю., Кирьянов А.В., Гребенюк И.В., Пестов Д.А. Результаты оценки погрешности гидроакустической навигационной системы с короткой базы в прибрежной зоне. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 4, С. 77 – 82.
14. Султанов Н. З., Айкожаев Н. М. Модуль оценки качества телеметрической информации // Автоматизация процессов управления. 2020. № 4 (62). С. 75–84.
15. Теодорович Н. Н. Повышение эффективности бортовой аппаратуры видеотелеметрии. : Общество с ограниченной ответственностью «Научный консультант», 2017. С. 79–86.
16. Титов А. М. Применение кодов Рида - Соломона для передачи данных от бортовых телеметрических систем и вычислительных комплексов // Космонавтика и ракетостроение. 2020. № 5 (116). С. 114–129.
17. Фомин А. В., Винокуров В. Д., Султанов Т. С. Макет программного комплекса оценки вероятности битовой ошибки при приёме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в условиях непреднамеренных помех // Научно-Техническая Конференция Санкт-Петербургского Нто Рэс Им. А.с. Попова, Посвященная Дню Радио. 2025. № 1 (80). С. 256–258.
18. Lee S.-R. и др. Development and Flight Testing of an Onboard Video System for the KSLV-I // AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN. 2011. Т. 9. С. 29–36.

References

1. Grigoriev A. P., Lyubimov A. V. Review of modern domestic telemetry systems of rocket and space technology products. : St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 2024. pp. 43–47.
2. Grigoriev A. P., Lyubimov A. V. Oblik perspektivnykh telemetricheskikh sistem izdeliy raketno-kosmicheskikh tekhniki [The Appearance of Advanced Telemetry Systems of Rocket

- and Space Technology Products]. : St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 2024. pp. 48–56.
3. Grigoriev A. P., Lyubimov A. V., Burlutsky S. G. Onboard Telemetric Systems of Rocket and Space Technology Products. : St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 2024. pp. 64–72.
 4. Dovbnya V. G., Koptev D. S. Principles of Using Intersymbol Distortion Correctors in Digital Systems for Receiving Multiposition Signals. : South-West State University, Kursk, 2025. pp. 25–31.
 5. Zvezdochkin M.Yu., Kamordin A.A., Safronov N.M. Fast algorithms for the restoration of distorted video frames using the information redundancy of the Motion JPEG codec. 2025. Т. 91. pp. 200–208.
 6. Klimov D. I. Prospects for the Development of Video Telemetry Systems for Rocket and Space Technology Products. : MIREA - Russian Technological University, 2019. pp. 67–69.
 7. Klimov D. I. Direction of Development of Video System for Measuring Physical Quantities in Products of the Rocket and Space Industry as One of the Varieties of Video Systems. : Perm National Research Polytechnic University, 2020. pp. 35–41.
 8. Klimov D. I., Mamedov T. T. Video Telemetry and Video Control Systems for Rocket and Space Technology Products. : Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev", 2018. pp. 27–29.
 9. Komov S.D., Pisanko A.A. Application of MLS-MIMO-OFDM technology in the adaptive system of information transmission in a stationary environment // Proceedings of the XXXI International Scientific and Technical Conference: in 6 vols. / Voronezh State University; JSC "Concern "Sozvezdie". – Voronezh: VSU Publishing House, 2025. pp. 384 – 393.
 10. Matyushin M. M., Makhalov D. A. Automated Processing of Information from the Onboard Video Control System of Launch Vehicles. 2021. № 4 (41). pp. 17–35.
 11. Moroz A. P. Rocket Telemetry. : Scientific Consultant, 123007, Moscow, Khoroshevskoye sh., 35k2, office 508, Moscow.
 12. Pershin I. M., Sankin A. V. Stand for the study of a distributed information transmission and reception system in the radio range. : Southern Federal University, 2021. Pp. 359–361.
 13. Rodionov A.Yu., Kiryanov A.V., Grebenyuk I.V., Pestov D.A. Results of Assessing the Error of the Hydroacoustic Navigation System from a Short Base in the Coastal Zone. Marine smart technology. 2024. No 4 part 4, pp. 77 – 82.
 14. Sultanov N. Z., Aykozhaev N. M. Module for assessing the quality of telemetric information. 2020. № 4 (62). pp. 75–84.
 15. Teodorovich N. N. Improving the Efficiency of Onboard Video Telemetry Equipment. : Limited Liability Company "Scientific Consultant", 2017. pp. 79–86.
 16. Titov A. M. Application of Reed-Solomon Codes for Data Transmission from Onboard Telemetric Systems and Computing Complexes // Cosmonautics and Rocket Engineering. 2020. № 5 (116). pp. 114–129.
 17. Fomin A. V., Vinokurov V. D., Sultanov T. S. Layout of the software complex for assessing the probability of a bit error when receiving signals with multi-position phase manipulation in the conditions of unintentional interference. A.S. Popova, dedicated to the Day of Radio. 2025. № 1 (80). pp. 256–258.

Набатов Н.Н. Системный анализ процессов передачи и приёма видеотелеметрической информации бортовой системы видеоконтроля ракет-носителей // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2026. – Т. 11 № 5(67) Ч.1 с. 72–88

18. Lee S.-R. etc. Development and Flight Testing of an Onboard Video System for the KSLV-I // AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN. 2011. Т. 9. pp. 29–36.
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.855

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСТАТОЧНОГО ЗАРЯДА БАТАРЕИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Шабров Т.С.

ФГАОУ ВО "МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ", Москва, Россия
(107023, город Москва, Большая Семёновская ул., д. 38), e-mail: onetima2@ya.ru

В работе решается задача прогнозирования трёх параметров тяговой аккумуляторной батареи электромобиля: нагрузки (тока), температуры и остаточного заряда (State of Charge, SOC). Для прогноза применяются методы машинного обучения, учитываются как аппаратные характеристики батареи, так и стиль вождения водителя - что повышает точность модели в реальных условиях эксплуатации. В качестве алгоритма используется градиентный бустинг CatBoost, в качестве данных - открытый набор Battery and Heating Data in Real Driving Cycles с телеметрией 72 поездок электромобиля BMW i3.

Сравниваются два подхода: нативная многовыходная регрессия CatBoost (MultiRMSE) и набор из трёх отдельных моделей, каждая под свой выход. Обе конфигурации дают R^2 выше 0,97 по каждой целевой переменной, но отдельные модели точнее. Полученные результаты применимы при разработке систем управления батареями (BMS) - для повышения энергоэффективности, безопасности и продления срока службы аккумуляторов электромобилей.

Ключевые слова: Электромобиль, аккумуляторная батарея, остаточный заряд, машинное обучение, градиентный бустинг, CatBoost, прогнозирование, многовыходная регрессия.

FORECASTING THE LOAD, TEMPERATURE AND STATE OF CHARGE OF AN ELECTRIC VEHICLE BATTERY USING MACHINE LEARNING METHODS

Shabrov T.S.

MOSCOW POLYTECHNIC UNIVERSITY, Moscow, Russia (107023, Moscow, Bolshaya Semenovskaya ul., 38), e-mail: onetima2@ya.ru

This paper addresses the problem of forecasting three parameters of an electric vehicle traction battery: load (current), temperature, and state of charge (SOC). Machine learning methods are applied; both the battery hardware characteristics and the driving style are taken into account, which improves model accuracy under real operating conditions. The CatBoost gradient boosting algorithm is used; the data source is the open-access Battery and Heating Data in Real Driving Cycles dataset with telemetry from 72 trips of a BMW i3 electric vehicle.

Two approaches are compared: native multi-output CatBoost regression (MultiRMSE) and an ensemble of three separate models, one per output. Both configurations achieve R^2 above 0.97 for every target variable, although the separate models are more accurate. The results are applicable to the development of Battery Management Systems (BMS) for improving energy efficiency, safety, and extending the service life of electric vehicle batteries.

Keywords: Electric vehicle, battery, state of charge, machine learning, gradient boosting, CatBoost, forecasting, multi-output regression.

За последние два десятилетия электромобили прошли путь от нишевого продукта до полноценной части транспортной инфраструктуры. Причины этого роста экологические, экономические, а также развитие интеллектуальных транспортных систем. Сердцем любого

электромобиля остаётся тяговая литий-ионная батарея: от её состояния зависят запас хода, безопасность и срок службы машины.

Для системы управления батареями (Battery Management System, BMS) критичны три параметра: токовая нагрузка, температура ячеек и остаточный заряд (State of Charge, SOC). Они физически связаны: рост нагрузки повышает температуру за счёт джоулева тепловыделения, температура же меняет эффективную ёмкость и динамику SOC [1; 2, с. 1832–1843]. Из-за этой связки прогноз каждого параметра должен учитывать состояние двух других, иначе модель упускает значительную часть информации, доступной в реальной телеметрии.

Классические методы оценки SOC - кулоновский счёт и метод разомкнутого напряжения (OCV–SOC) имеют известные ограничения. Первый накапливает ошибку из-за дрейфа датчиков тока, второй требует условий, близких к равновесным, и плохо работает на динамичных режимах движения [3, с. 252–261]. Расширенный фильтр Калмана (EKF), который часто встраивают в BMS, тоже не идеален: он сильно зависит от качества электрохимической модели и подбора параметров [4, с. 6730–6739]. На таком фоне методы машинного обучения выглядят перспективно, они умеют работать с большими массивами телеметрии и вытаскивать нелинейные зависимости, которые сложно описать аналитически.

В работе разбирается применение градиентного бустинга CatBoost для совместного прогноза нагрузки, температуры и SOC батареи. Алгоритм был выбран не случайно: он стабильно показывает хорошие результаты на табличных данных, нормально работает на небольших выборках, а механизм упорядоченного бустинга снижает риск переобучения [5, с. 6638–6648]. Тема актуальна: количество публикаций по ML-оценке состояния батарей растёт каждый год, и со стороны автопроизводителей есть прямой запрос на более точные алгоритмы для реальных, а не лабораторных условий.

Набор данных

Источником данных стал открытый набор Battery and Heating Data in Real Driving Cycles, опубликованный на IEEE DataPort [6]. В нём собрана телеметрия 72 поездок BMW i3 (батарея 60 А·ч) городских и пригородных. Все параметры пишутся с частотой 1 Гц, а температуры окружающей среды покрывают диапазон от –5°C зимой до +30°C летом. В сумме это 1 094 793 строки и 49 столбцов; общая длительность всех поездок - около 304 часов.

Каждая запись описывает состояние машины в конкретный момент времени и содержит несколько групп параметров:

Параметры батареи: Battery Voltage - напряжение батарейного блока, измеряемое в вольтах (от 302 до 395 В по датасету); Battery Current - ток, потребляемый от батареи, в амперах (положительный при разряде, отрицательный при рекуперации); Battery Temperature - температура ячеек, °C; SoC - остаточный заряд батареи в процентах.

Параметры транспортного средства: Velocity - текущая скорость автомобиля, км/ч; Throttle - положение педали газа, %; Longitudinal Acceleration - продольное ускорение, м/с²; Regenerative Braking Signal - бинарный сигнал работы системы рекуперативного торможения.

Параметры системы отопления и кондиционирования: Heating Power CAN - мощность обогрева салона, кВт; AirCon Power - мощность кондиционера, кВт. Климатическая система - второй по объёму потребитель энергии в электромобиле после тягового двигателя, поэтому её игнорировать нельзя.

Параметры окружающей среды: Ambient Temperature - температура наружного воздуха, °C; Elevation - высота над уровнем моря, м. Температура воздуха задаёт тепловой режим батареи и её эффективную ёмкость.

Служебные поля: trip_file - идентификатор поездки, Time [s] - метка времени в секундах от начала поездки.

Особенность этого набора в том, что данные собраны в реальных поездках, а не в лаборатории по стандартизированным циклам (NEDC, WLTC). Это редкое сочетание: большинство публичных датасетов по батареям записаны на стендах, и проверять на них гипотезы о влиянии стиля вождения и внешних условий, по сути, нечем. Здесь - можно.

В качестве целевых переменных взяты три параметра батареи: SoC, Battery Temperature и Battery Current. Они связаны физикой и образуют ту самую систему, точный прогноз которой нужен BMS для нормальной работы.

Работа с данными

Сначала был проведён разведочный анализ данных (EDA): нужно было оценить качество датасета и посмотреть, как распределены ключевые переменные. Гистограммы трёх целевых переменных показаны на Рисунке 1.

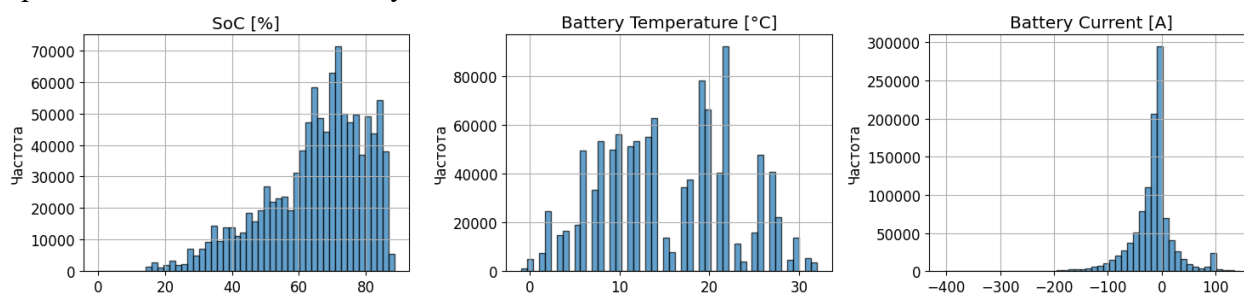


Рисунок 1. Распределения целевых переменных

Рисунок 1 - Гистограммы трёх целевых переменных

Распределения целевых переменных: SOC, температура батареи и ток SOC распределён со смещением вправо: основная масса значений лежит в диапазоне 55–85% - это типичный рабочий диапазон при ежедневной эксплуатации электромобиля. Крайние значения (ниже 10% и выше 90%) встречаются редко, и это согласуется со стратегией защиты батареи от ускоренной деградации. У температуры батареи распределение мультимодальное, с пиками около 7, 14 и 21°C, это отражение трёх сезонов записи (зима, межсезонье, лето). У тока резкий пик около нуля (остановки и движение накатом) и длинный левый хвост, который дотягивается до -400 А: это пиковые разряды при резких ускорениях [7, с. 636–643].

Чтобы понять связи между параметрами, построена корреляционная матрица (Рисунок 2). По коэффициентам корреляции видно, какие признаки реально несут информацию и пригодятся в модели.

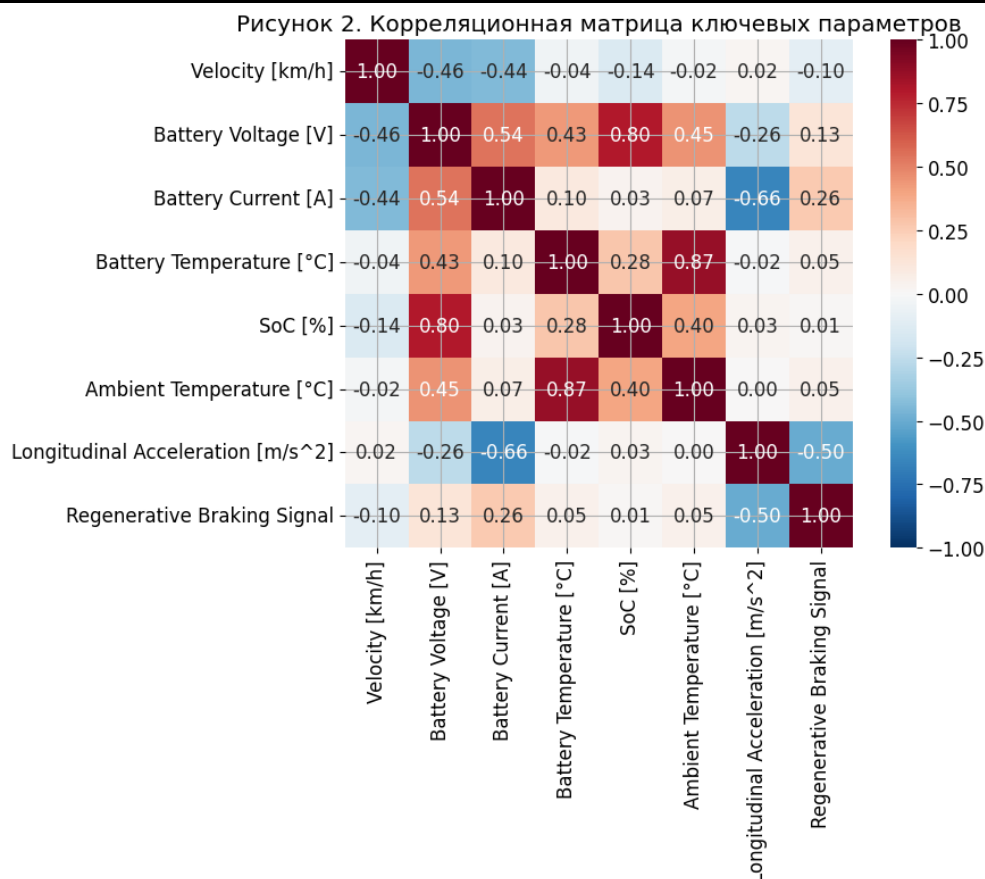


Рисунок 2 - Корреляционная матрица ключевых параметров датасета

Часть зависимостей ожидаема. Корреляция 0,87 между температурой батареи и температурой воздуха подтверждает: внешние условия сильно влияют на тепловой режим аккумуляторного блока. Связь SOC с напряжением (0,80) это отражение физики, описываемой кривой OCV–SOC. Ток отрицательно коррелирует с продольным ускорением (–0,66): на разгоне ток по модулю растёт в режиме разряда, на торможении меняет знак - это работа рекуперации. А вот скорость со средней температурой батареи коррелирует слабо (–0,04). Отсюда вывод: для нормального прогноза температуры одной скорости мало, нужен комплекс факторов.

Полезно посмотреть и на то, как параметры ведут себя внутри одной поездки. На Рисунке 3 динамика SOC, температуры и тока за первые 360 секунд одной из поездок.

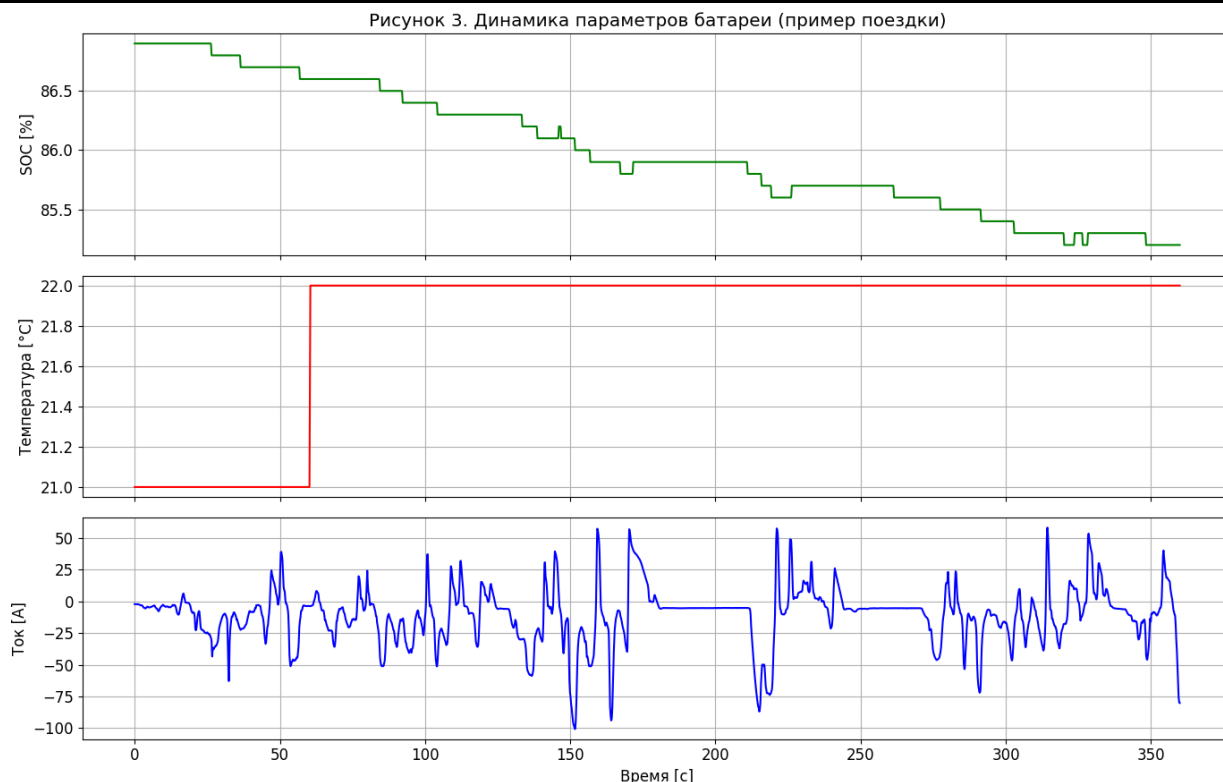


Рисунок 3 - Динамика параметров батареи на примере фрагмента одной поездки

На графике хорошо видны характерные особенности реальной поездки. SOC падает монотонно, но с разной скоростью, в зависимости от режима движения. Температура батареи меняется ступеньками (датчик имеет погрешность 1°C) и при этом инерционна. Ток же дёргается высокочастотно, отражая чередование ускорений и торможений. Эта пара - инерционная температура и быстро меняющийся ток и становится главной проблемой при попытке использовать всё в одной прогнозной модели [8, с. 834–854].

На предобработке из исходных 49 столбцов оставлено 12 - те, что прямо связаны с целевыми переменными. Больше двадцати столбцов с температурами отдельных точек салона (дефлекторы, зоны ног, головы) исключены как лишние. Пропуски заполнены линейной интерполяцией внутри каждой поездки с группировкой по `trip_file`, чтобы интерполяция не «перетекала» через границы разных поездок.

Проектирование признаков

Чтобы превратить временные ряды телеметрии в табличный формат, с которым умеет работать градиентный бустинг, использован метод скользящего окна. Идея простая: для каждого момента времени t берётся окно последних W секунд, и из него извлекаются статистические характеристики параметров батареи и машины, плюс производные признаки, описывающие стиль вождения. Полученный вектор признаков подаётся на вход модели, она сразу предсказывает значения трёх целевых переменных на горизонте h .

В работе взяты $W = 60$ секунд и горизонт $h = 3$ секунды. Эти числа продиктованы практикой BMS: прогноз на несколько секунд вперёд используется для управления мощностью и балансировки ячеек в реальном времени [9, с. 1506–1511]. На выходе получился набор из 21 признака - средние, дисперсии, минимумы и максимумы ключевых параметров по

окну, прямые значения датчиков на момент t , а также три признака стиля вождения: среднее абсолютное ускорение, доля рекуперативного торможения и средняя скорость в окне.

Обучение модели

Основным алгоритмом выбран CatBoost - библиотека градиентного бустинга над решающими деревьями, разработанная компанией Яндекс [5, с. 6638–6648]. Причин его выбрать было три. Первая - он стабильно даёт хорошие результаты на табличной регрессии. Вторая - нормально работает на небольших выборках. Третья - использует симметричные (oblivious) деревья и упорядоченный бустинг, и это снижает риск переобучения.

Сравниваются две конфигурации. Первая - нативная многовыходная регрессия CatBoost с функцией потерь MultiRMSE, в ней одна модель сразу предсказывает все три целевые переменные. Вторая - три отдельные модели CatBoost, по одной на каждую переменную (SOC, температура, ток). Данные разбиты на обучающую и тестовую выборки в пропорции 80/20 с учётом идентификаторов поездок: записи из одной поездки не должны попадать одновременно и в обучение, и в тест. Ниже - фрагмент кода, реализующий оба подхода:

```
from catboost import CatBoostRegressor
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score

# Многовыходная модель (MultiRMSE)
multi_model = CatBoostRegressor(loss_function='MultiRMSE',
                                iterations=1000, depth=6, learning_rate=0.05)
multi_model.fit(X_train, Y_train)
Y_pred_multi = multi_model.predict(X_test)

# Три отдельные модели
separate_models = {}
for target in ['target_SoC', 'target_Temp', 'target_Current']:
    m = CatBoostRegressor(loss_function='RMSE',
                          iterations=1000, depth=6, learning_rate=0.05)
    m.fit(X_train, y_train[target])
    separate_models[target] = m
```

Качество моделей оценивалось тремя стандартными метриками регрессии: среднеквадратическая ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE) и коэффициент детерминации (R^2). Этот набор позволяет посмотреть на точность с разных сторон: RMSE усиливает штраф за крупные ошибки, MAE устойчив к выбросам, R^2 показывает долю объяснённой дисперсии целевой переменной [10, с. 3146–3154].

Результаты эксперимента для обоих подходов показаны на Рисунках 4 и 5.

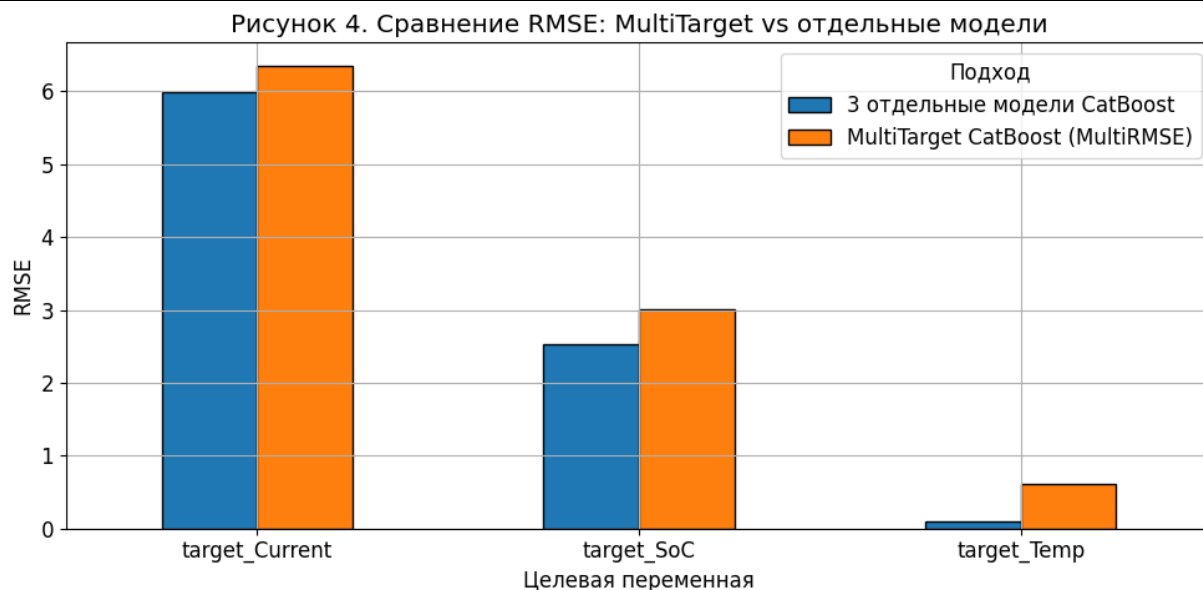


Рисунок 4 - Сравнение RMSE: многовыходная модель vs отдельные модели

По всем трём целевым переменным отдельные модели дают меньшую ошибку RMSE. Разница для температуры особенно бросается в глаза: $0,10^{\circ}\text{C}$ у отдельной модели против $0,62^{\circ}\text{C}$ у многовыходной - то есть в 6 раз. Для SOC: $2,54\%$ против $3,00\%$, для тока: $5,98\text{ A}$ против $6,35\text{ A}$. Логика тут такая: MultiRMSE оптимизирует суммарную ошибку по трём выходам сразу, и модели приходится искать компромисс между разными целями. Три отдельные модели от такого компромисса свободны - каждая занимается своей переменной.

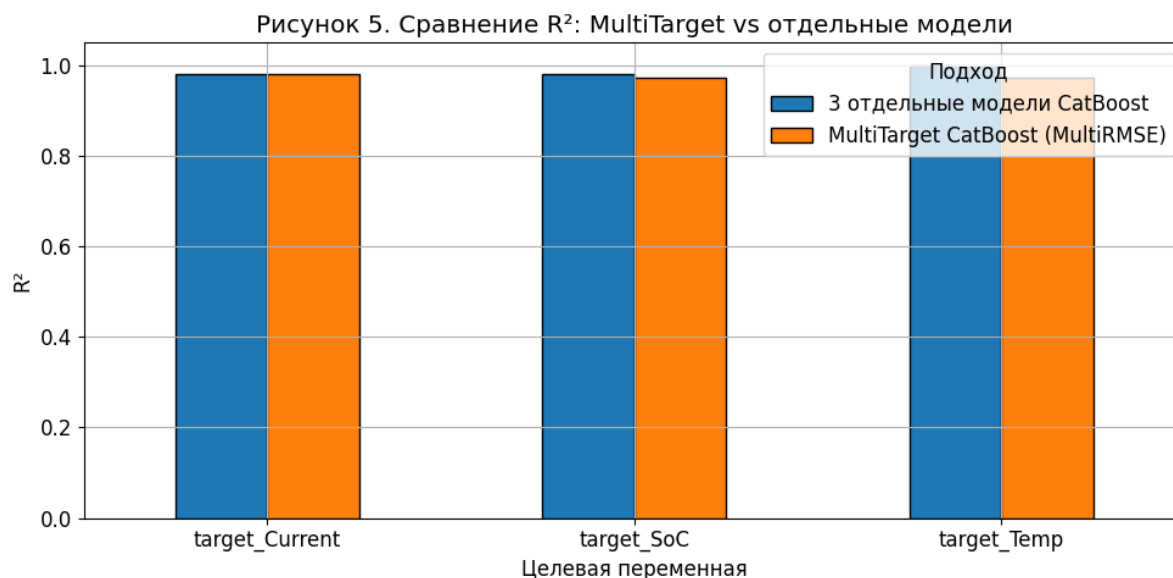


Рисунок 5 - Сравнение R^2 : многовыходная модель vs отдельные модели

При этом обе конфигурации показывают высокое качество прогноза - R^2 больше $0,97$ по всем целевым переменным. У отдельных моделей цифры такие: $R^2 = 0,9992$ для температуры, $0,9812$ для тока и $0,9791$ для SOC. Для температуры это уже фактически идеальный прогноз, для SOC и тока - очень высокая точность. Многовыходная модель чуть хуже: средний R^2 по трём целям около $0,9736$.

Чтобы оценить работу модели качественно, на рисунке 6 показано наложение прогнозов многовыходной модели CatBoost на фактические значения тестовой выборки (фрагмент из 5000 наблюдений).

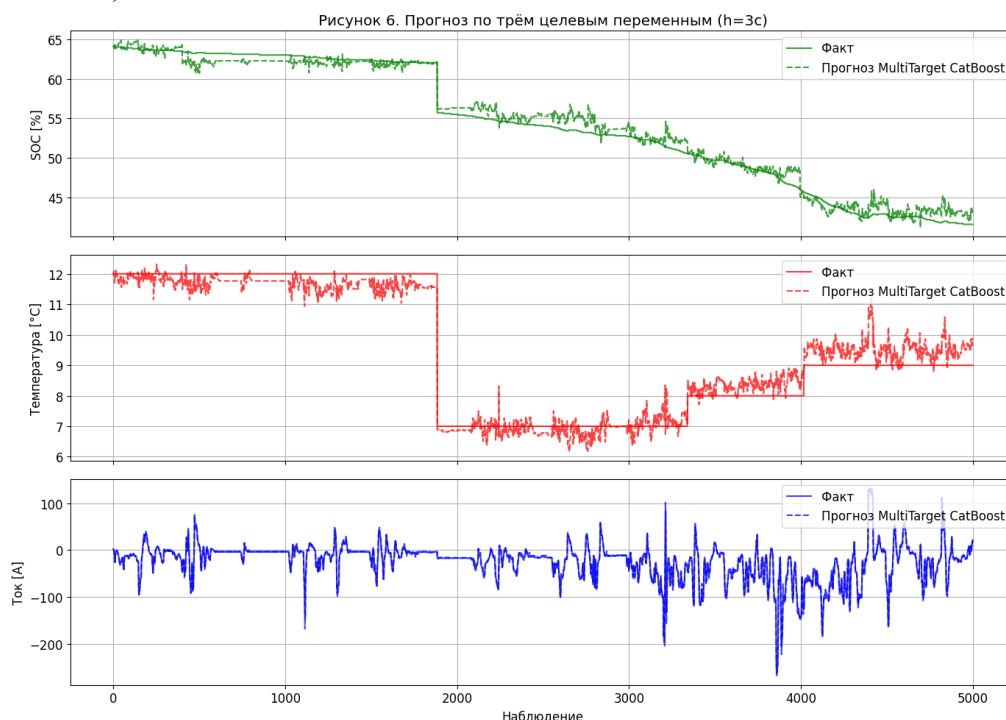


Рисунок 6 - Прогноз многовыходной модели CatBoost на тестовой выборке ($h = 3 c$)

Прогнозы визуально точно повторяют динамику всех трёх параметров. Для SOC (верхний график) модель отслеживает монотонное снижение заряда, включая участки с разной скоростью разряда. Для температуры (средний график) прогноз ловит и плавные тренды, и ступенчатые изменения. С током (нижний график) сложнее: общую структуру колебаний модель воспроизводит, но пиковые значения предсказывает с меньшей амплитудой. Причина простая - редкие выбросы тока при резких ускорениях слабо представлены в обучающей выборке, и модели попросту не на чем учиться этим экстремумам.

Итог эксперимента: специализированные модели CatBoost, обученные по отдельности под каждую целевую переменную, точнее единой многовыходной модели. При этом многовыходная модель сохраняет практически значимое качество ($R^2 > 0,97$) и выигрывает по простоте развёртывания: одна модель вместо трёх - это упрощает интеграцию в BMS и снижает требования к вычислительным ресурсам. Так что выбор зависит от приоритетов проекта: если важна максимальная точность, то три отдельные модели, если простота и согласованность прогнозов - многовыходная.

Заключение

В работе решалась задача прогнозирования нагрузки, температуры и остаточного заряда батареи электромобиля методами машинного обучения. Был сделан разведочный анализ данных, спроектированы признаки методом скользящего окна, обучены и сравнены две конфигурации CatBoost. Результаты: оба подхода - многовыходная регрессия и три отдельные модели дают высокое качество прогноза ($R^2 > 0,97$), при этом отдельные модели в среднем

точнее на 34% по нормированной RMSE. Самый точный прогноз получен для температуры батареи: $RMSE = 0,10^{\circ}C$, $R^2 = 0,9992$.

Практическая ценность результата заключается в применимости при разработке систем управления батареями электромобилей. Учёт стиля вождения и аппаратных характеристик батареи вместе с совместным анализом трёх ключевых параметров заметно повышают точность мониторинга состояния аккумуляторной системы по сравнению с классическими методами. Дальнейшее развитие работы наблюдается в расширении выборки на данные других моделей электромобилей, увеличении горизонта прогноза и проверке устойчивости моделей к сезонным изменениям условий эксплуатации.

Список литературы

1. Коровин Н.В., Скундин А.М. Химические источники тока: справочник / Ин-т электрохимии РАН. - М.: Издательство МЭИ, 2003. - 740 с.
2. Xiong R., Cao J., Yu Q. et al. Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles // IEEE Access. - 2018. - Vol. 6. - P. 1832–1843.
3. Plett G.L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 1. Background // Journal of Power Sources. - 2004. - Vol. 134, Iss. 2. - P. 252–261.
4. Chemali E., Kollmeyer P.J., Preindl M. et al. Long Short-Term Memory Networks for Accurate State-of-Charge Estimation of Li-ion Batteries // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2018. - Vol. 65, Iss. 8. - P. 6730–6739.
5. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A. et al. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). - 2018. - P. 6638–6648.
6. Steinstraeter M., Buberger J., Trifonov D. Battery and Heating Data in Real Driving Cycles [Электронный ресурс] // IEEE DataPort. - 2020. URL: <https://ieee-dataport.org/open-access/battery-and-heating-data-real-driving-cycles> (дата обращения: 15.04.2026).
7. van der Spoel D., Wickramasinghe H. et al. The influence of driving patterns on energy consumption in electric car driving and the role of regenerative braking // Transportation Research Procedia. - 2017. - Vol. 27. - pp. 636–643.
8. Hannan M.A., Lipu M.S.H., Hussain A. et al. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2017. - Vol. 78. - pp. 834–854.
9. Ng K.S., Moo C.S., Chen Y.P., Hsieh Y.C. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries // Applied Energy. - 2009. - Vol. 86, Iss. 9. - pp. 1506–1511.
10. Ke G., Meng Q., Finley T. et al. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). - 2017. - P. 3146–3154.
11. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. - 2001. - Vol. 45, Iss. 1. - pp. 5–32.
12. Friedman J.H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine // Annals of Statistics. - 2001. - Vol. 29, No. 5. - pp. 1189–1232.
13. Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2035 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 28.12.2022 № 4261-р.

14. CatBoost Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://catboost.ai/docs/> (дата обращения: 15.04.2026).

References

1. Korovin N.V., Skundin A.M. Chemical Current Sources: Handbook / Institute of Electrochemistry, Russian Academy of Sciences. Moscow: MPEI Publishing House, 2003. p.740
 2. Xiong R., Cao J., Yu Q. et al. Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles // IEEE Access. - 2018. - Vol. 6. - pp. 1832–1843.
 3. Plett G.L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 1. Background // Journal of Power Sources. - 2004. - Vol. 134, Iss. 2. - pp. 252–261.
 4. Chemali E., Kollmeyer P.J., Preindl M. et al. Long Short-Term Memory Networks for Accurate State-of-Charge Estimation of Li-ion Batteries // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2018. - Vol. 65, Iss. 8. - pp. 6730–6739.
 5. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A. et al. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). - 2018. - pp. 6638–6648.
 6. Steinstraeter M., Buberger J., Trifonov D. Battery and Heating Data in Real Driving Cycles [Electronic resource] // IEEE DataPort. - 2020. URL: <https://ieee-dataport.org/open-access/battery-and-heating-data-real-driving-cycles> (access date: 04/15/2026).
 7. van der Spoel D., Wickramasinghe H. et al. The influence of driving patterns on energy consumption in electric car driving and the role of regenerative braking // Transportation Research Procedia. - 2017. - Vol. 27. - pp. 636–643.
 8. Hannan M.A., Lipu M.S.H., Hussain A. et al. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2017. - Vol. 78. - pp. 834–854.
 9. Ng K.S., Moo C.S., Chen Y.P., Hsieh Y.C. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries // Applied Energy. - 2009. - Vol. 86, Iss. 9. - pp. 1506–1511.
 10. Ke G., Meng Q., Finley T. et al. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). - 2017. - pp. 3146–3154.
 11. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. - 2001. - Vol. 45, Iss. 1. - pp. 5–32.
 12. Friedman J.H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine // Annals of Statistics. - 2001. - Vol. 29, No. 5. - pp. 1189–1232.
 13. Strategy for the Development of the Automotive Industry of the Russian Federation through 2035: approved by RF Government Order No. 4261-r of 28.12.2022.
 14. CatBoost Documentation [Electronic resource]. URL: <https://catboost.ai/docs/> (accessed: 15.04.2026).
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.85:37.015.3:373:519.23

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СНИЖЕНИЯ УЧЕБНОЙ ВОВЛЕЧЁННОСТИ ШКОЛЬНИКОВ

Вафин Б.Р.

ФГАОУ ВО "КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ", Казань, Россия (420008, Республика Татарстан, г. Казань, Кремлевская ул, д. 18 к. 1), e-mail: vafin20@gmail.com

В статье проводится сравнительный теоретико-методологический анализ методов машинного обучения применительно к задаче прогнозирования снижения учебной вовлечённости школьников. Рассматриваются шесть классов алгоритмов: логистическая регрессия, деревья решений, метод случайного леса, градиентный бустинг (XGBoost), рекуррентные нейронные сети с архитектурой LSTM и модели анализа временных рядов (ARIMA). Для каждого метода описываются принцип действия, эмпирически подтверждённые показатели качества прогноза (AUC), требования к объёму и структуре данных, степень интерпретируемости и практические ограничения применения в условиях школьной образовательной среды. Показано, что значения AUC варьируются в широком диапазоне в зависимости от контекста и объёма обучающих данных. На основе многокритериального сравнения обосновывается вывод о том, что метод случайного леса в сочетании с инструментами объяснимого ИИ (SHAP) является наиболее сбалансированным решением для практического прогнозирования академических рисков в условиях ограниченного объёма образовательных данных, характерного для школ.

Ключевые слова: Машинное обучение, прогнозирование академических рисков, учебная вовлечённость, случайный лес, градиентный бустинг, LSTM, Learning Analytics, объяснимый ИИ, SHAP, школьное образование, цифровые следы.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTING DECLINE IN SCHOOL STUDENTS' ACADEMIC ENGAGEMENT

Vafin B.R.

"KAZAN (PRIVOLZHSKIY) FEDERAL'NYI UNIVERSITET", Kazan, Russia (420008, Respublika Tatarstan, Kazan, Kremlynskaya ul, d. 18 k. 1), e-mail: vafin20@gmail.com

The article presents a comparative theoretical and methodological analysis of machine learning methods applied to the task of predicting a decline in school students' academic engagement. Six algorithm classes are considered: logistic regression, decision trees, random forest, gradient boosting (XGBoost), recurrent neural networks with LSTM architecture, and time series models (ARIMA). For each method, the operating principle, empirically confirmed prediction quality metrics (AUC), data volume and structure requirements, degree of result interpretability, and practical limitations for application in school settings are described. It is shown that AUC values vary widely depending on context and training data volume. Based on a multi-criteria comparison, it is argued that random forest combined with explainable AI tools (SHAP) represents the most balanced solution for practical academic risk prediction under the constrained data conditions typical of schools.

Keywords: Machine learning, academic risk prediction, student engagement, random forest, gradient boosting, LSTM, Learning Analytics, explainable AI, SHAP, school education, digital traces.

Введение

Прогнозирование снижения учебной вовлечённости представляет собой одну из центральных задач современной образовательной аналитики. Практическая значимость этой задачи определяется тем, что снижение мотивации и учебной активности поддаётся коррекции значительно лучше на ранних стадиях, чем после того, как оно отразилось на академических результатах [7]. Между тем существующие цифровые инструменты, применяемые в школах, — электронные журналы и LMS-системы — фиксируют исключительно итоговые показатели успеваемости и посещаемости, не обеспечивая раннего выявления тревожных паттернов.

Рост объёма цифровых образовательных данных открывает принципиально новые возможности. Цифровые следы обучающихся — данные о времени работы в системе, регулярности выполнения заданий, частоте обращений к материалам — образуют временные ряды, которые могут служить основой для построения предиктивных моделей [10]. Это направление активно развивается в рамках образовательной аналитики, как показано в работах [9].

Вместе с тем выбор конкретного метода машинного обучения для задачи прогнозирования остаётся нетривиальной задачей. Различные алгоритмы существенно отличаются по точности прогнозирования, требованиям к объёму и качеству данных, а также уровню интерпретируемости результатов. Эмпирические исследования показывают, что эти различия могут быть значительными и во многом зависят от контекста применения. Так, в работе на данных школьной образовательной среды алгоритм Random Forest достиг точности 81,4%, что отражает более умеренные показатели по сравнению с результатами, получаемыми на крупных образовательных платформах [9]. Это подчёркивает, что выбор метода машинного обучения требует учёта специфики конкретной образовательной среды и характеристик доступных данных.

Цель настоящей статьи — провести сравнительный теоретико-методологический анализ основных методов машинного обучения на основе эмпирических данных из опубликованных исследований и обосновать выбор оптимального подхода для условий школьной образовательной среды.

Постановка задачи прогнозирования академических рисков

В исследованиях по прогнозированию образовательных результатов, включая работу Побединской и Заславской, задача прогнозирования снижения учебной вовлечённости формализуется как проблема бинарной классификации: необходимо заранее определить, пересечёт ли активность обучающегося критический порог в пределах заданного временного интервала [3]. В качестве целевой переменной используется бинарная метка «риск снижения успеваемости/вовлечённости» или прогнозируемое значение интегрального показателя, что позволяет применять алгоритмы машинного обучения для заблаговременного выявления обучающихся группы риска.

Входными данными для построения предиктивных моделей служат агрегированные показатели, извлекаемые из цифровых следов обучающихся. Как показывают российские исследования, наибольшей предиктивной силой обладают не статические показатели активности, а динамические признаки — траектории изменения поведения обучающихся во времени [4]. В частности, анализ цифрового следа в LMS Moodle демонстрирует, что для

точного прогнозирования необходимо отслеживать изменение показателей активности за последовательные временные окна: темп снижения частоты обращений к учебным материалам, динамику выполнения заданий, нарастание нерегулярности учебной активности [2]. Исследования подтверждают, что модели, обученные на динамических признаках с учетом временных паттернов, устойчиво превосходят модели, использующие только моментальный «снимок» текущего состояния обучающегося [6].

Ключевое методологическое ограничение задачи в школьной среде — дефицит данных. В отличие от крупных университетских платформ или MOOC, где число пользователей исчисляется десятками тысяч, типичная школа располагает данными нескольких сотен обучающихся за один учебный год. Это существенно сужает применимость методов, критически требовательных к объёму обучающей выборки, прежде всего глубоких нейронных сетей. Российские исследователи подчёркивают, что перенос моделей, разработанных для крупных образовательных платформ, в условия школы без учёта специфики объёма данных приводит к неадекватным оценкам их практической применимости [9].

Сравнительный анализ методов машинного обучения

Логистическая регрессия является отправной точкой сравнения. Как отмечается в российских исследованиях образовательной аналитики, логистическая регрессия демонстрирует устойчивые, хотя и умеренные, результаты прогнозирования при работе с данными ограниченного объёма [9]. Модель обеспечивает полную прозрачность: каждый признак вносит аддитивный вклад в логарифм отношения шансов, что позволяет педагогам интерпретировать влияние отдельных факторов. Модель устойчива при малых выборках и не склонна к переобучению при надлежащей регуляризации. Существенное ограничение — неспособность улавливать нелинейные взаимодействия между признаками.

Деревья решений обеспечивают сопоставимую с логистической регрессией точность при сохранении высокой интерпретируемости: структура дерева представима в виде набора правил «если–то», понятных педагогу без специальной подготовки [3]. Однако деревья решений склонны к переобучению и нестабильны при малых выборках — незначительные изменения обучающей выборки могут приводить к существенно различающимся структурам [11]. Данный недостаток преодолевается в ансамблевых методах.

Метод случайного леса представляет собой ансамбль деревьев решений, обучаемых на случайных подвыборках. Российские исследования подтверждают, что данный метод демонстрирует более высокие показатели точности по сравнению с базовыми классификаторами при прогнозировании образовательных результатов [5]. При этом точность метода закономерно зависит от объёма и качества данных: на крупных образовательных платформах достигаются более высокие результаты, тогда как в условиях ограниченных школьных выборок показатели снижаются, оставаясь при этом практически значимыми [3]. Метод устойчив к зашумлённым данным и не требует нормализации признаков.

Градиентный бустинг (XGBoost, LightGBM) демонстрирует высокую вариативность результатов в зависимости от характеристик данных. Как показывают исследования, при наличии богатого признакового пространства и достаточного объёма обучающей выборки метод может превосходить случайный лес, однако при работе с малыми выборками преимущество становится менее выраженным [2, 12]. Нативная интерпретируемость метода

низка, поэтому для практического использования в образовании рекомендуется применять инструменты объяснимого ИИ, такие как SHAP [8].

Рекуррентные нейросети с архитектурой LSTM специально разработаны для работы с последовательными данными. Исследования подтверждают, что при наличии больших объёмов лонгитюдных данных данный класс моделей обеспечивает высокую точность прогнозирования временных паттернов учебной активности [4]. Однако применение LSTM в школьной среде сопряжено с принципиальными ограничениями: для надёжного обучения требуются тысячи траекторий, значительные вычислительные ресурсы и специализированная экспертиза, что ограничивает применимость метода в условиях отдельных школ [9].

Модели анализа временных рядов применяются для прогнозирования будущих значений индекса вовлечённости на основе его исторической динамики [7]. Российские исследователи подчёркивают важность явного моделирования временной динамики в образовательных данных, особенно в контексте выраженной календарной структуры учебного года [9, 3]. Точность в задаче бинарной классификации (при пороговой бинаризации непрерывного прогноза) может уступать ансамблевым методам, однако подход органично дополняет их, позволяя выявлять сезонность учебной активности и долгосрочные тренды.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика методов ML для прогнозирования снижения учебной вовлечённости (обобщённые данные из опубликованных исследований)

Метод	AUC (в задачах предсказания рисков)	Объём данных	Интерпретируемость	Применимость в школе	Источник
Логистическая регрессия	Базовый уровень	Малый	Высокая (коэффициенты признаков)	Высокая — прозрачная основа	[9, 3]
Дерево решений	Средний	Малый	Высокая (правила if-then)	Высокая — наглядна для педагогов	[3,11]
Случайный лес (Random Forest)	Высокий (зависит от объёма данных)	Средний	Средняя (feature importance)	Высокая — оптимальный баланс	[5,3]
Градиентный бустинг (XGBoost)	Высокий / переменный (контекстно-зависим)	Средний	Низкая (требует SHAP)	Средняя — при наличии XAI	[2, 12,8].
LSTM (рекуррентные нейросети)	Высокий (на больших выборках)	Большой (тыс. траекторий)	Очень низкая	Ограниченная — дефицит данных	[9,4]
Анализ временных рядов (ARIMA)	Средний	Средний (лонгитюд)	Средняя (тренды явны)	Средняя — полезна для динамики	[9, 3,7].

Примечание: оценки точности приведены в относительном виде на основе обобщения результатов российских исследований; для метода случайного леса указана зависимость от объёма данных — от крупных образовательных платформ до типичных школьных выборок.

Обсуждение: критерии выбора метода для школьной среды

Проведённый сравнительный анализ позволяет сформулировать ряд принципиальных выводов. Прежде всего необходимо признать, что единственного «лучшего» метода не существует: показатели точности варьируются в широком диапазоне в зависимости от объёма данных, набора признаков и контекста образовательной среды. Как подчёркивается в российских исследованиях образовательной аналитики, перенос моделей и выводов из одного образовательного контекста в другой без учёта специфики данных недопустим [9, 2].

Для школьной среды определяющим является критерий объёма данных. Анализ опубликованных исследований показывает, что точность методов машинного обучения закономерно снижается при уменьшении объёма обучающей выборки: на крупных образовательных платформах достигаются более высокие результаты, тогда как в условиях ограниченных школьных данных показатели оказываются скромнее, хотя и остаются практически значимыми [9, 3, 5]. Для школы с 500–700 учениками метод случайного леса обеспечивает точность, которая, хотя и уступает результатам на крупных платформах, тем не менее значимо превосходит базовые методы классификации и позволяет получать практически полезные сигналы для раннего вмешательства.

Второй критерий — интерпретируемость — в образовательном контексте значим принципиально иначе, чем в большинстве других областей применения ML. Педагог должен не только получить прогноз риска, но и понять, какие именно поведенческие факторы его обусловили, чтобы выработать адресное вмешательство [3]. Современные инструменты объяснимого ИИ, такие как SHAP, позволяют при заданном прогнозе увидеть, какие признаки и в каком направлении повлияли на решение модели для каждого конкретного обучающегося [8]. Это делает применение методов объяснимого ИИ не факультативным инструментом, а обязательным компонентом системы прогнозирования в образовании.

С учётом обоих критериев метод случайного леса представляется оптимальным для базовой реализации в школьной среде: при умеренных требованиях к данным он обеспечивает наилучшее соотношение точности и интерпретируемости среди рассматриваемых методов [9,3]. Градиентный бустинг с SHAP-объяснениями — перспективное усовершенствование при наличии достаточных данных [4,12]. Применение рекуррентных нейронных сетей (LSTM), несмотря на высокие показатели точности на больших выборках, реально лишь для образовательных холдингов или региональных платформ с консолидированными данными, где доступны тысячи траекторий обучения [9, 4].

Заключение

В статье проведён сравнительный теоретико-методологический анализ шести классов методов машинного обучения применительно к задаче прогнозирования снижения учебной вовлечённости школьников. Ключевой вывод состоит в том, что показатели качества прогноза существенно варьируются в зависимости от объёма данных и контекста образовательной среды: на крупных образовательных платформах достигаются более высокие результаты, тогда как в условиях ограниченных школьных выборок точность закономерно снижается. Эта

зависимость подчёркивает важность учёта масштаба данных при выборе метода прогнозирования.

Установлено, что в условиях типичной школы с ограниченным объёмом данных метод случайного леса обеспечивает оптимальный баланс точности, устойчивости к зашумлённым данным и интерпретируемости через показатели важности признаков. Логистическая регрессия сохраняет ценность как прозрачный базовый классификатор для валидации результатов. Глубокие нейронные сети (LSTM), несмотря на высокие показатели точности на крупных выборках, ограниченно применимы в отдельных школах из-за дефицита данных и высоких требований к вычислительным ресурсам и экспертной подготовке.

Обязательным компонентом для любого из методов является применение инструментов объяснимого ИИ, прежде всего SHAP, обеспечивающих интерпретируемость прогнозов для педагогов и возможность разработки адресных педагогических вмешательств.

Дополнительно установлено, что динамические признаки — изменения показателей активности во времени, а не их абсолютные значения — обладают наибольшей предиктивной силой. Это указывает на принципиальную важность лонгитюдной структуры входных данных и необходимости отслеживания траекторий учебной активности обучающихся.

Практическая значимость результатов состоит в возможности их использования при проектировании систем интеллектуальной поддержки педагогических решений в школьной образовательной среде. Дальнейшие исследования целесообразно направить на эмпирическую валидацию выводов на реальных данных российских школьных платформ, а также на сравнительное тестирование методов при разных горизонтах прогноза (1, 2, 4 недели) с учётом календарной структуры учебного года.

Список литературы

1. Анализ временных рядов [Электронный ресурс]. — URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/732080/> (Дата обращения 25.03.2026)
2. Возможности использования цифровых следов для прогнозирования образовательных достижений студентов [Электронный ресурс]. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-ispolzovaniya-tsifrovyyh-sledov-dlya-prognozirovaniya-obrazovatelnyh-dostizheniy-studentov> (Дата обращения 11.03.2026)
3. Использование алгоритмов машинного обучения для прогноза успеваемости учащихся основной школы [Электронный ресурс]. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-algoritmov-mashinnogo-obucheniya-dlya-prognoza-uspevaemosti-uchaschihsya-osnovnoy-shkoly> (Дата обращения 18.03.2026)
4. Исследование цифрового следа обучающегося для повышения качества и оптимизации образовательного процесса [Электронный ресурс]. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tsifrovogo-sleda-obuchayuschegosya-dlya-povysheniya-kachestva-i-optimizatsii-obrazovatel'nogo-protssesa> (Дата обращения 19.03.2026)
5. Применение машинного обучения для анализа образовательных результатов студентов вузов [Электронный ресурс]. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-mashinnogo-obucheniya-dlya-analiza-obrazovatelnyh-rezultatov-studentov-vuzov> (Дата обращения 06.03.2026)

6. Прогнозирование успешности обучения по дисциплине на основе универсальных показателей цифрового следа [Электронный ресурс]. — URL: <https://info.infojournal.ru/jour/article/view/955> (Дата обращения 12.03.2026)
7. Теоретический анализ развития учебной мотивации учащихся младшего школьного возраста [Электронный ресурс]. — URL: <https://scipress.ru/pedagogy/articles/teoreticheskij-analiz-razvitiya-uchebnoj-motivatsii-uchashhikhsya-mladshego-shkolnogo-vozrasta.html> (Дата обращения 05.03.2026)
8. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Unified-Approach-to-Interpreting-Model-Lundberg-Lee/442e10a3c6640ded9408622005e3c2a8906ce4c2#cited-papers> (Дата обращения 22.03.2026)
9. Learning analytics in Russia and abroad: level of development, trends and prospects [Электронный ресурс]. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/learning-analytics-in-russia-and-abroad-level-of-development-trends-and-prospects> (Дата обращения 22.03.2026)
10. Predicting academic performance of students from VLE big data using deep learning models [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0747563219304017> (Дата обращения 03.03.2026)
11. Random Forest in Simple English: Why is it so popular? [Электронный ресурс]. — URL: <https://towardsdatascience.com/random-forest-in-simple-english-why-is-it-so-popular-3ba04d0374d/> (Дата обращения 02.03.2026)
12. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.kdd.org/kdd2016/papers/files/rfp0697-chenAemb.pdf> (Дата обращения 02.03.2026)

References

1. Analysis of Time Series. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/732080/> (Accessed 25.03.2026)
2. Possibilities of Using Digital Traces to Predict Students' Educational Achievements. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-ispolzovaniya-tsifrovyyh-sledov-dlya-prognozirovaniya-obrazovatelnyh-dostizheniy-studentov> (Accessed 11.03.2026)
3. The use of machine learning algorithms for predicting the performance of students of basic school. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-algoritmov-mashinnogo-obucheniya-dlya-prognoza-uspevaemosti-uchashihhsya-osnovnoy-shkoly> (Accessed 18.03.2026)
4. Study of the digital footprint of a student to improve the quality and optimization of the educational process. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tsifrovogo-sleda-obuchayushchegosya-dlya-povysheniya-kachestva-i-optimizatsii-obrazovatel'nogo-protsessa> (Accessed 19.03.2026)
5. Application of Machine Learning for the Analysis of Educational Results of University Students. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-mashinnogo-obucheniya-dlya-analiza-obrazovatelnyh-rezultatov-studentov-vuzov> (Accessed 06.03.2026)
6. Prognostirovaniye uspehnosti obucheniya po disciplinarii na osnove universalnykh pokazateley tsifrovogo sleda [Predicting the success of learning in a discipline based on

- universal indicators of the digital footprint]. — URL: <https://info.infojournal.ru/jour/article/view/955> (Accessed 12.03.2026)
7. Theoretical Analysis of the Development of Educational Motivation of Primary School Students. — URL: <https://scipress.ru/pedagogy/articles/teoreticheskij-analiz-razvitiya-uchebnoj-motivatsii-uchashhikhsya-mladshego-shkolnogo-vozrasta.html> (Accessed 05.03.2026)
8. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. — URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Unified-Approach-to-Interpreting-Model-Lundberg-Lee/442e10a3c6640ded9408622005e3c2a8906ce4c2#cited-papers> (Accessed 22.03.2026)
9. Learning analytics in Russia and abroad: level of development, trends and prospects. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/learning-analytics-in-russia-and-abroad-level-of-development-trends-and-prospects> (Accessed 22.03.2026)
10. Predicting academic performance of students from VLE big data using deep learning models [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0747563219304017> (Дата обращения 03.03.2026)
11. Random Forest in Simple English: Why is it so popular? [Electronic resource]. — URL: <https://towardsdatascience.com/random-forest-in-simple-english-why-is-it-so-popular-3ba04d0374d/> (Accessed 02.03.2026)
12. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. — URL: <https://www.kdd.org/kdd2016/papers/files/rfp0697-chenAemb.pdf> (Accessed 02.03.2026)
-



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.934:004.85

АНАЛИЗ РЕЧЕВОГО ПАТТЕРНА КОМИКА КАК ОСНОВА ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ СИНТЕЗА РЕПЛИК В ЗАДАЧАХ ПОСТОБРАБОТКИ КОМЕДИЙНЫХ ВЫСТУПЛЕНИЙ

¹ Часов П.С., Сараев П.В.

ФГБОУ ВО «МИРЭА - РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Москва, Россия (119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78, стр. 4), e-mail: ¹119454pasha_chasov@mail.ru

В статье рассматривается задача синтеза речи, имитирующей уникальный речевой паттерн комика, с целью повышения эффективности постобработки стендап-выступлений. Предложен пайплайн, включающий сегментацию аудио, извлечение акустических признаков и голосовых эмбеддингов, а также обучение прогнозной модели на архитектуре прямого прогнозирования длительностей без механизма внимания. Эксперимент проведен на 60 минутах аудиоматериала (около 900 реплик). Показано, что предложенная система способна генерировать разборчивую речь с узнаваемым тембром, однако качество синтеза ограничено «сглаживанием» просодических контуров и монотонностью интонации. Сделан вывод о принципиальной работоспособности подхода и необходимости усложнения модели для передачи полного речевого паттерна артиста комедийного жанра.

Ключевые слова: Синтез речи, речевой паттерн комика, постобработка выступлений, прогнозная модель, мел-спектрограмма, голосовой эмбеддинг, прямое прогнозирование длительностей, вокодер Гриффина-Лима

THE ANALYSIS OF THE COMEDIAN'S SPEECH PATTERN AS THE BASIS OF A PREDICTIVE MODEL FOR THE SYNTHESIS OF CUES IN THE TASKS OF POST-PROCESSING COMEDIC PERFORMANCES

¹ Chasov P.S., Saraev P.V.

MIREA - RUSSIAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, Moscow, Russia (119454, Moscow, avenue Vernadsky, 78, b. 4), e-mail: ¹119454pasha_chasov@mail.ru

The article discusses the task of synthesizing speech that mimics the comedian's unique speech pattern in order to improve the efficiency of post-processing of stand-up performances. A pipeline is proposed that includes audio segmentation, extraction of acoustic features and voice embeddings, as well as training a predictive model based on the architecture of direct prediction of durations without the attention mechanism. The experiment was conducted on 60 minutes of audio material (about 900 replicas). It is shown that the proposed system is capable of generating intelligible speech with a recognizable timbre, but the quality of synthesis is limited by the "smoothing" of prosodic contours and monotony of intonation. The conclusion is made about the fundamental efficiency of the approach and the need to complicate the model in order to convey the full speech pattern of an artist of the comedy genre.

Keywords: Speech synthesis, comedian's speech pattern, speech postprocessing, predictive model, chalk spectrogram, voice embedding, direct prediction of durations, Griffin-Lima vocoder.

Уникальный голос человека, его «звуковой портрет», является продуктом сложного взаимодействия нескольких физических и акустических параметров. Для его автоматического

анализа и последующего воссоздания эти параметры необходимо выделить и описать в количественной форме.

Фундаментальная частота (F0) является базовым параметром, определяющим воспринимаемую высоту голоса. Это частота колебаний голосовых связок во время фонации (звучных звуков). Ее динамическое изменение во времени образует мелодический контур речи — интонацию. Именно этот контур во многом отвечает за передачу смысловых акцентов, эмоций (вопрос, удивление, ирония) и формирует узнаваемую манеру речи. Например, для конкретного комика может быть характерна особая, «ломаная» или гиперболизированная интонация, которая становится частью его сценического образа.

Временная организация речи — это не менее важный аспект индивидуальности. Длительность отдельных звуков (фонем), слов и пауз между ними определяет ритм и темп речи. Ускорение или замедление темпа, нестандартные паузы (например, для создания комического эффекта «напуганной паузы») являются мощными выразительными средствами. Автоматическое моделирование этих временных паттернов — одна из ключевых задач синтеза характерной речи. [1-3]

Если высота тона и ритм отвечают за «мелодию» и «ритмику» речи, то тембр — это уникальная «окраска» голоса, позволяющая отличать одного говорящего от другого, даже если они произносят одну фразу с одинаковой интонацией. Тембр обусловлен резонансными свойствами голосового тракта (форма рта, носа, гортани) и кодируется в спектральном составе сигнала. Для его анализа широко используется мел-спектрограмма — это временно-частотное представление звука, которое аппроксимирует нелинейное восприятие высоты звука человеческим ухом. Она фиксирует, как распределена энергия сигнала по различным частотным полосам в каждый момент времени, являясь основным носителем информации о тембре и артикуляции.

Динамический профиль, или энергия сигнала, отражает изменения громкости во времени. Этот параметр связан с акцентуацией, эмоциональным наполнением и физиологическими усилиями говорящего. Характерное усиление на ключевых словах шутки или, наоборот, нарочито тихое произнесение реплики — примеры использования динамики как части речевого паттерна.

Для перевода описанных выше компонентов речи в числовую форму, пригодную для обработки алгоритмами машинного обучения, используется ряд специализированных методов и инструментов.

Мел-спектрограмма является основным входным и целевым представлением для большинства современных моделей синтеза. Процесс ее вычисления стандартизирован:

1. Предобработка аудиосигнала (нормализация, пре-эмфаза для усиления высоких частот).
2. Разбиение на кадры с использованием оконной функции (например, Ханна).
3. Применение быстрого преобразования Фурье (БПФ) к каждому кадру для перехода в частотную область.
4. Группировка полученных спектральных амплитуд по мел-шкале с использованием набора треугольных фильтров. Количество фильтров определяет детализацию представления. Полученная матрица значений (время и частотные полосы) и есть мел-спектрограмма.

Для компактного и информативного представления уникального тембра говорящего используются нейросетевые модели, обученные на задаче верификации или идентификации диктора. В данной работе применяется модель ECAPA-TDNN. Ее ключевые особенности:

- сеть использует сверточные слои с расширенными временными контекстами, что позволяет эффективно захватывать долгосрочные зависимости в речи;
- модель обучается с использованием функции потерь, которая максимизирует сходство между эмбедингами одного диктора и минимизирует сходство между разными дикторами;
- на выходе для каждого аудиофрагмента получается вектор фиксированной размерности. Этот вектор — голосовой отпечаток — содержит агрегированную информацию о тембре и может служить управляющим параметром для синтезатора, «настраивая» его на конкретного человека.

Интеграция этих методов — PYIN для F0, стандартного банка мел-фильтров для спектрограммы и ECAPA-TDNN для получения голосового вектора — формирует мощный инструмент для детального декомпозиции речевого сигнала на составляющие, отвечающие за его индивидуальность. [4-8]

Исторически первыми получили распространение конкатенативные методы (unit selection). Их принцип основан на сборке новой фразы из заранее записанных и размеченных фрагментов речи (единиц) из обширной базы данных. Основное преимущество — высокое натуралистическое качество, так как используется реальный человеческий голос. Однако эти системы требовали огромных объемов записей для покрытия всех возможных контекстов, были сложны в настройке и часто страдали от неестественных переходов между выбранными единицами, особенно для эмоциональной или художественной речи.

Статистические параметрические методы стали следующим шагом. Вместо работы с сырым аудио они синтезировали речь на основе предсказанных параметров (например, спектральных огибающих), которые затем пропускались через вокодер — алгоритм, превращающий параметры обратно в звук.

Прорыв произошел с приходом нейросетевых моделей, которые кардинально изменили парадигму. Модели на основе механизма внимания, такие как Tacotron, научились автоматически и мягко выравнивать последовательность текстовых символов и выходных акустических кадров, генерируя спектрограммы высокого качества. Однако эти модели могут быть нестабильны в обучении (проблемы «расхождения внимания») и порождать пропуски или повторения в синтезированной речи.

Альтернативой, на которой фокусируется данная работа, является подход прямого прогнозирования. Его ключевая идея — устранение неявного и изменчивого механизма внимания. Вместо этого модель явно обучается предсказывать точную длительность каждого входного текстового токена с помощью отдельного модуля-предиктора длительностей. После этого выровненная по времени последовательность текстовых скрытых состояний напрямую отображается в последовательность акустических параметров (мел-спектрограмм) через feed-forward сети. [9-10]

К представителям этого подхода относятся архитектуры FastSpeech и ее последующие версии. Их основные преимущества:

- процесс синтеза становится детерминированным и устойчивым, исключая артефакты внимания;
- прямое прогнозирование без итеративных шагов работает значительно быстрее;
- возможность независимого управления скоростью речи (через предиктор длительностей) и другими параметрами.

В рамках данного исследования была реализована упрощенная модель, следующая этой философии: входной текст кодируется, и модель напрямую регрессирует значения мел-спектрограммы для каждого токена, минуя сложные скрытые представления переменной длины. Это позволяет проверить принципиальную осуществимость анализа и синтеза уникального паттерна на базовом, но концептуально верном фундаменте.

Ключевые этапы в структуре архитектуры включают:

- установку зависимостей и загрузку модели транскрибации;
- процесс сегментации аудио и создания первичного датасета;
- извлечение и сохранение акустических признаков;
- структурирование данных для обучения;
- определение архитектуры и процедуры обучения нейросетевой модели;
- инференс и оценку результатов.

Модель работает как последовательный преобразователь «текст-в-спектрограмму». Первый слой — это таблица эмбедингов, которая преобразует каждый входной символ текста в плотный вектор фиксированной размерности. Это позволяет модели работать с семантическими и контекстными связями между символами, а не с их буквенными кодами. [11]

Далее последовательность полученных векторных представлений обрабатывается двунаправленным рекуррентным слоем типа LSTM. Этот слой играет роль контекстного кодировщика. Он проходит по последовательности в прямом и обратном направлениях, аккумулируя информацию обо всём предложении. Для каждого символа на выходе этого слоя формируется новое скрытое состояние, которое обогащено контекстом от соседних слов. Это необходимо для правильного прогнозирования интонации и просодии, зависящих от положения слова во фразе.

Финальным этапом является проекционный линейный слой. Он принимает обогащённые контекстом векторные представления и выполняет регрессию. Для каждого текстового токена слой предсказывает строго определённый фрагмент временной последовательности целевой мел-спектрограммы. Количество шагов спектрограммы, предсказываемых для одного токена, определяется на этапе предобработки данных грубым расчётом длительности. [12]

Обучение модели было настроено как задача минимизации среднеквадратичной ошибки между предсказанной спектрограммой и спектрограммой, извлечённой из исходного аудио. Эта метрика напрямую измеряет расстояние между распределениями предсказанных и реальных акустических признаков, заставляя модель учиться воспроизводить корректные спектральные огибающие и их временную динамику. [13]

После обучения модели необходим механизм для генерации новой речи на основе произвольного текста. Этот процесс, называемый инференсом, был реализован в виде отдельного класса-обработчика.

Его работа начинается с токенизации входного текстового предложения, то есть разбиения на отдельные символы или токены, соответствующие словарю, использованному при обучении модели. Полученная последовательность индексов преобразуется в тензор и подаётся на вход обученной модели. [14]

Модель, следуя своей архитектуре, выполняет прямое распространение. Эмбединг-слой создаёт векторные представления токенов, рекуррентный слой кодирует контекст, а финальный линейный слой генерирует на выходе матрицу предсказанных значений — синтезированную мел-спектрограмму для всей фразы. Важно отметить, что в отличие от этапа обучения, модель на инференсе работает авторегрессивно только на уровне контекстного кодировщика; предсказание спектрограммы для всех токенов происходит за один проход, что обеспечивает высокую скорость генерации.

Полученная спектрограмма является нормализованной. Перед преобразованием в звук необходимо применить обратное преобразование — денормализацию — чтобы вернуть значения в физический диапазон, ожидаемый вокодером.

Заключительным и критически важным этапом пайплайна является преобразование предсказанной мел-спектрограммы в фактический аудиосигнал. Для этой цели используется внешний вокодер — специализированный алгоритм или модель, обученная реконструировать волновую форму по спектральным характеристикам. В рамках данной работы применялся фазово-нечувствительный вокодер на основе алгоритма Гриффина-Лима, который итеративно уточняет фазу сигнала для получения итогового аудиофайла. Именно на этом этапе цифровые предсказания модели материализуются в слышимую речь, качество которой напрямую зависит от точности прогноза спектрограммы.

Экспериментальное исследование проводилось на персональном компьютере с графическим ускорителем NVIDIA GeForce RTX 3080. Исходный аудиоматериал, общая продолжительностью около 60 минут, был обработан моделью Whisper для получения текстовых расшифровок с временными метками. В результате сегментации было сформировано приблизительно 900 отдельных реплик, которые после очистки от шумных и некорректных записей были разделены на обучающую (80%) и валидационную (20%) выборки.

Акустические признаки извлекались со следующими параметрами: частота дискретизации аудио — 22050 Гц, размер окна для БПФ — 1024 сэмпла, шаг — 256 сэмплов, количество мел-фильтров — 80. Это обеспечило баланс между детализацией спектрограммы и вычислительной эффективностью. Для получения голосовых эмбедингов использовалась предобученная модель ECAPA-TDNN с размерностью выходного вектора 192. Выявленные акустические признаки отображены на Рисунке 1.

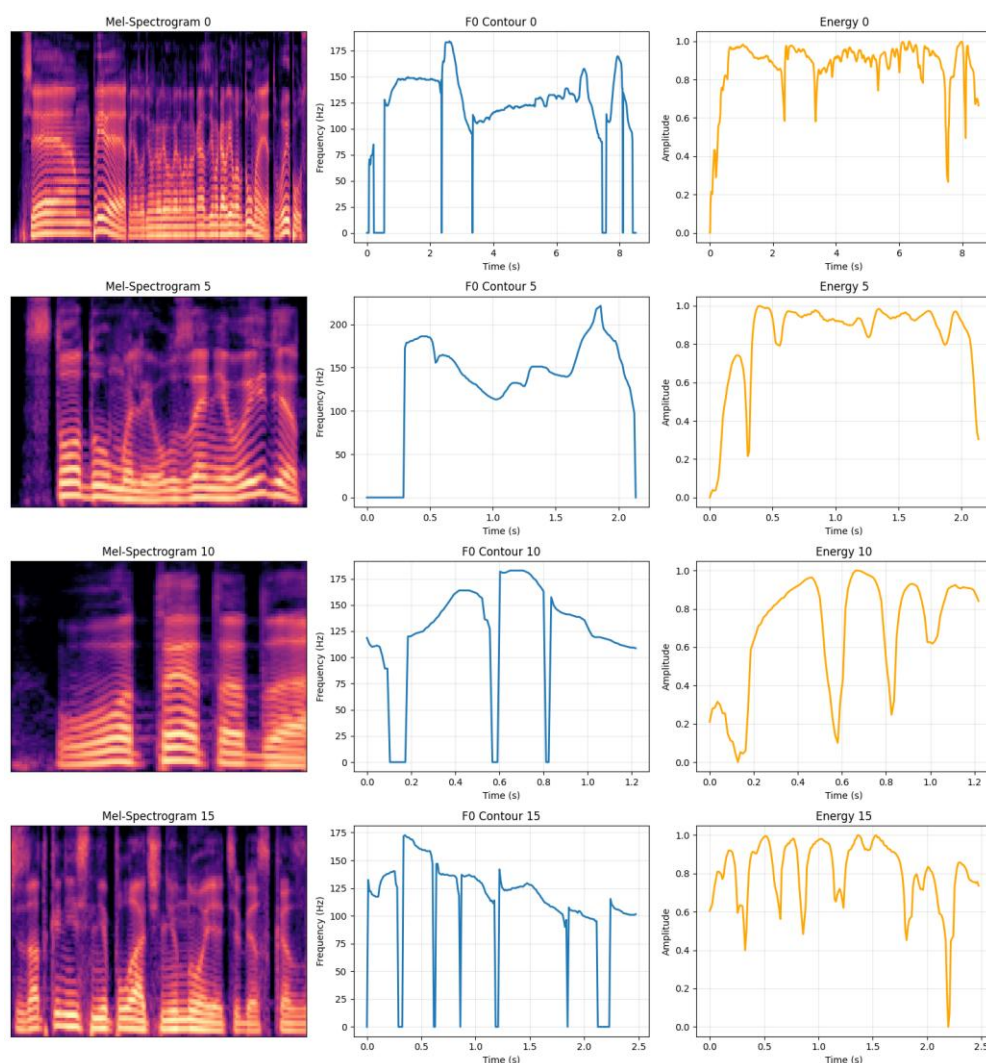


Рисунок 1— Акустические признаки исходных аудио

Архитектура прогнозной модели SimpleTTS была настроена со следующими гиперпараметрами: размерность эмбедингов символов — 256, размерность скрытого состояния двунаправленного LSTM-слоя — 512, количество слоев LSTM — 2. Обучение проводилось с использованием оптимизатора Adam со скоростью обучения 0.001 и коэффициентом снижения 0.9 на каждом эпохе. Функция потерь — среднеквадратичная ошибка. Обучение продолжалось в течение 50 эпох с мониторингом потерь на валидационной выборке для предотвращения переобучения. [15]

Процесс обучения показал устойчивую сходимость: значение функции потерь на обучающей выборке последовательно уменьшалось. Кривая потерь на валидационной выборке демонстрировала аналогичную динамику, что указывает на корректную регуляризацию и способность модели к обобщению на несмотренных данных.

Основным методом объективной оценки стало визуальное сравнение эталонных и сгенерированных мел-спектрограмм. На тестовой фразе «Привет, это моя спектрограмма» было проведено детальное сопоставление. Анализ показал, что модель успешно научилась воспроизводить глобальную временную структуру: границы между словами и основными

фонемами четко прослеживаются в предсказанной спектрограмме. Спектральные огибающие, отвечающие за общий тембр, также переданы корректно, что свидетельствует об усвоении базовых голосовых характеристик. Полученная спрогнозированная спектрограмма отображена на Рисунке 2

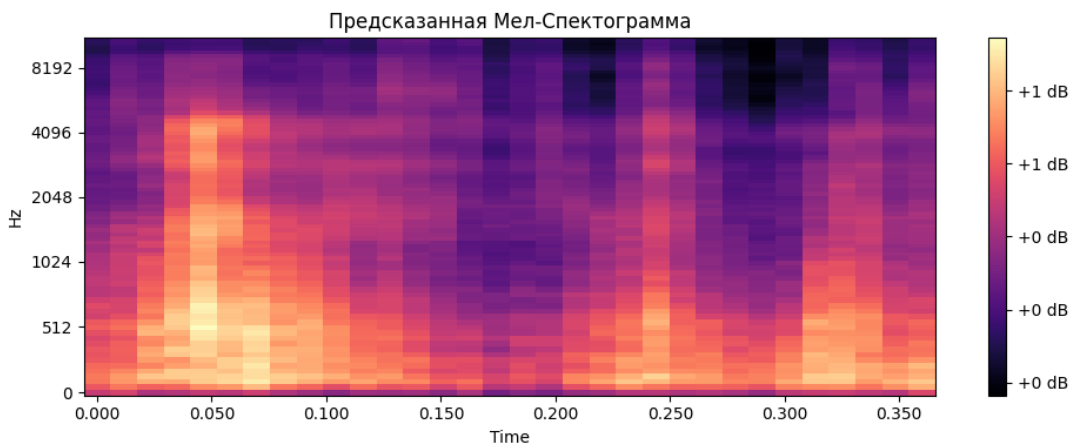


Рисунок 2 — Предсказанная мел-спектрограмма

Однако детальный анализ выявил и существенные ограничения. Тонкие просодические элементы, такие как точный мелодический контур (вариации высоты тона внутри гласных) и сложные переходные шумные компоненты согласных, были воспроизведены с меньшей точностью. Предсказанные спектрограммы выглядели несколько «сглаженными» по сравнению с оригинальными, что является типичным эффектом для моделей, обучаемых с использованием среднеквадратичной ошибки, которая стремится к усреднению предсказаний. [16]

Качественная оценка была проведена путем прослушивания аудио, реконструированного из предсказанных спектрограмм с помощью вокодера Гриффина-Лима. Синтезированная речь сохраняла общую узнаваемость голосового тембра целевого комика, что подтверждает эффективность метода извлечения и использования признаков. Фразы были разборчивы. Однако естественность и выразительность оказались ограниченными: интонация звучала упрощенно и монотонно, а ритмический рисунок — недостаточно живым. Это напрямую соотносится с наблюдаемым визуальным «сглаживанием» спектрограмм и указывает на недостаточную способность простой LSTM-архитектуры смоделировать всю сложность индивидуального речевого паттерна.

Таким образом, эксперимент подтвердил принципиальную работоспособность всего пайплайна — система способна генерировать разборчивую речь с узнаваемым тембром. Однако достигнутый уровень детализации и естественности синтеза указывает на необходимость доработки модели.

Список литературы

1. Рен Ю., Руан Ю., Тан Х. и др. FastSpeech: быстрое, надежное и управляемое преобразование текста в речь // Достижения в области нейронных систем обработки информации. – 2019. – Том 32. – С. 3165-3174.

2. Жэнь Ю., Ху С., Тан Х. и др. FastSpeech 2: Быстрое и высококачественное сквозное преобразование текста в речь // Международная конференция по обучению репрезентации (ICLR). – 2021.
3. Ким Дж., Конг Дж., Сон Дж. Хифиганан: Генеративные состязательные сети для эффективного и высокоточного синтеза речи // Достижения в области нейронных систем обработки информации. – 2020. – Том 33. – С. 17022-17033.
4. Конг З., Пинг У., Хуан Дж. и др. DiffWave: универсальная диффузионная модель для синтеза звука // Международная конференция по обучающим представлениям (ICLR). – 2021.
5. Цзя Ю., Чжан Ю., Вайс Р. и др. Переход обучения от проверки говорящего к многоязычному синтезу текста в речь // Достижения в области нейронных систем обработки информации. – 2018. – Том 31. – С. 4485-4495.
6. Деспланк Б., Тьенпондт Дж., Демуйнк К. ESCAPA-TDNN: Особое внимание к каналу, его распространению и агрегации при проверке говорящих на основе TDNN // Proc. Interspeech 2020. – 2020. – С. 3830-3834.
7. Ван Л., Ван К., Папир А., Морено И. Л. Обобщенные сквозные потери для верификации громкоговорителей // Международная конференция IEEE по акустике, речи и обработке сигналов (ICASSP). – 2018. – С. 4879-4883.
8. Баевский А., Чжоу Ю., Мохамед А., Аули М. wav2vec 2.0: фреймворк для самостоятельного изучения речевых представлений // Достижения в области нейронных систем обработки информации. – 2020. – Т. 33. – С. 12449-12460.
9. Поляк А., Ади Ю., Копет Дж. и др. Ресинтез речи на основе дискретных разрозненных самоконтролируемых представлений // Proc. Interspeech 2021. – 2021. – С. 3615-3619.
10. Тянь Дж., Чжан Ю., Чжоу Дж., Ву З. Передача эмоций между говорящими на разных языках на основе нормализации уровня состояния говорящего и обучения преобразованию текста в речь под наблюдением // Препринт arXiv arXiv: 2210.15153. - 2022.
11. Чжан Ю., Конг Дж., Сюэ Х. и др. VITS: Условно-вариационный автоэнкодер с состязательным обучением для сквозного преобразования текста в речь // Материалы 38-й Международной конференции по машинному обучению (ICML). – 2021. – С. 12466-12476.
12. Пашке А., Гросс С., Масса Ф. и др. PyTorch: Высокопроизводительная библиотека глубокого обучения в императивном стиле // Достижения в области нейронных систем обработки информации. – 2019. – Том 32. – С. 8024-8035.
13. Ямамото Р., Сонг Э., Ким Дж.-М. Параллельный генератор сигналов: модель быстрой генерации сигналов на основе генеративных состязательных сетей со спектрограммой с различным разрешением // Международная конференция IEEE по акустике, речи и обработке сигналов (ICASSP). – 2020. – С. 6199-6203.
14. Кумар К., Кумар Р., де Буассьер Т. и др. Мельган: Генерирующие состязательные сети для синтеза условных сигналов // Достижения в области нейронных систем обработки информации. – 2019. – Том 32. – С. 14910-14921.

15. Пренгер Р., Валле Р., Катандзаро Б. WaveGlow: Поточковая генерирующая сеть для синтеза речи // Международная конференция IEEE по акустике, речи и обработке сигналов (ICASSP). – 2019. – С. 3617-3621.
16. Руар С., Массуд Ф., Дефоссез А. НуPoradise: открытая основа для генеративного синтеза речи с использованием диффузионных моделей // Тридцать седьмая конференция по нейронным системам обработки информации (NeurIPS), посвященная наборам данных и тестам. – 2023.

References

1. Ren Yu., Ruan Yu., Tang H. FastSpeech: fast, reliable and controlled text-to-speech conversion // Achievements in the field of neural information processing systems. – 2019. – Volume 32. – pp. 3165-3174.
2. Ren Yu., Hu S., Tang H. FastSpeech 2: Fast and high-quality end-to-end text-to-speech conversion // International Conference on Representation Training (ICLR). - 2021.
3. Kim J., Kong J., Song J. Hifigan: Generative adversarial networks for efficient and high-precision speech synthesis // Advances in neural information processing systems. – 2020. – Volume 33. – pp. 17022-17033.
4. Kong Z., Ping W., Huang J. DiffWave: a universal diffusion model for sound synthesis // International Conference on Educational Representations (ICLR). – 2021.
5. Jia Yu., Zhang Yu., Weiss R. et al. The transition of learning from speaker verification to multilingual text-to-speech synthesis // Achievements in the field of neural information processing systems. – 2018. – Volume 31. – pp. 4485-4495.
6. Desplank B., Tienpondt J., Demuink K. ECAPA-TDNN: Special attention to the channel, its distribution and aggregation when checking speakers based on TDNN // Proc. Interspeech 2020. – 2020. – pp. 3830-3834.
7. Wang L., Wang K., Papir A., Moreno I. L. Generalized end-to-end losses for speaker verification // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2018. pp. 4879-4883.
8. Bayevsky A., Zhou Yu., Mohamed A., Auli M. wav2vec 2.0: a framework for self-study of speech representations // Advances in neural information processing systems. – 2020. – Vol. 33. – pp. 12449-12460.
9. Polyak A., Adi Yu., Kopet J. and others . Speech resynthesis based on discrete disparate self-controlled representations // Proc. Interspeech 2021. – 2021. - pp. 3615-3619.
10. Tian J., Zhang Y., Zhou J., Wu Z. Transmission of emotions between speakers of different languages based on normalization of the speaker's state level and learning to convert text into speech under supervision // Preprint arXiv arXiv:2210.15153.-2022.11.
11. Zhang Yu., Kong J., Xue H. VITS: Conditional variational autoencoder with competitive learning for end-to-end text-to-speech conversion // Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2021. – pp. 12466-12476.
12. Paschke A., Gross S., Mass F. PyTorch: A high-performance library of deep learning in an imperative style // Achievements in the field of neural information processing systems. 2019. Volume 32. pp. 8024-8035.

13. Yamamoto R., Song E., Kim J.-M. Parallel signal generator: a model of fast signal generation based on generative adversarial networks with a spectrogram with different resolution // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2020, pp. 6199-6203.
-



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 519.816

СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ПОЛЕЗНОСТИ НА ОСНОВЕ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ОЦЕНОК ПРЕДПОЧТЕНИЙ И ИСТИННОСТИ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

¹Балашов О.В., ²Букачев Д.С.

¹АО «РАДИОЗАВОД», НИО-4, Смоленск, Россия, (214027, г. Смоленск, улица Котовского, 2), e-mail: smradio@mail.ru

²ФГБОУ ВО «СМОЛЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ», Смоленск, Россия (214000, г. Смоленск, ул. Пржевальского, 4), e-mail: dsbuka@yandex.ru

Статья посвящена проблеме восстановления функции полезности управленческих решений в организационно-технических системах (ОТС), функционирующих в условиях статистической неопределенности. Предложен метод, объединяющий лингвистические оценки предпочтений эксперта (лицо, принимающее решения – ЛПР) с лингвистической переменной «Истинность», что позволяет учесть степень уверенности эксперта в собственных высказываниях. Восстановление функции полезности осуществляется путем решения оптимизационной задачи, минимизирующей невязку между полученными от эксперта нечеткими оценками и значениями искомой полиномиальной функции. Приводится иллюстративный пример, демонстрирующий работоспособность метода. Обсуждается место предложенного подхода в контексте современных методов многокритериального анализа решений.

Ключевые слова: полезность, лингвистические предпочтения, нечеткая логика, восстановление функции полезности, организационно-технические системы, статистическая неопределенность, парные сравнения.

A METHOD FOR RESTORING THE UTILITY FUNCTION BASED ON LINGUISTIC ASSESSMENTS OF PREFERENCES AND TRUTH FOR DECISION-MAKING IN ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

¹Balashov O.V., ²Bukachev D.S.

¹JOINT-STOCK COMPANY "RADIO FACTORY", RESEARCH DEPARTMENT 4, Smolensk, Russia, (214027, Smolensk, street Kotovskogo, 2), e-mail: smradio@mail.ru

²FEDERAL STATE EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION SMOLENSK STATE UNIVERSITY, Smolensk, Russia (214000, Smolensk, street Przewalski, 4), e-mail: dsbuka@yandex.ru

This article examines the problem of reconstructing the utility function of management decisions in organizational and technical systems (OTS) operating under conditions of statistical uncertainty. A method is proposed that combines linguistic assessments of expert (decision maker) preferences with the linguistic variable "Truth", allowing for the expert's degree of confidence in their statements to be taken into account. The utility function is reconstructed by solving an optimization problem that minimizes the discrepancy between the fuzzy assessments received from the expert and the values of the desired polynomial function. An illustrative example is provided demonstrating the method's feasibility. The place of the proposed approach in the context of modern methods of multicriteria decision analysis is discussed.

Keywords: Utility, linguistic preferences, fuzzy logic, utility function recovery, organizational and technical systems, statistical uncertainty, paired comparisons.

Современные организационно-технические системы (ОТС) характеризуются высокой степенью сложности, динамичностью внешней и внутренней среды и наличием множества противоречивых критериев при принятии управленческих решений. В условиях, когда для каждого из возможных следствий решения известны вероятностные характеристики, говорят о принятии решений в условиях статистической неопределенности (риска). Сложность задачи выбора в таких условиях обусловлена субъективным характером критериев, применяемых лицом, принимающим решения (ЛПР).

Функция полезности является центральным понятием, позволяющим формализовать систему предпочтений ЛПР. В общем виде она может быть записана как функционал [6, 8]:

$$U(X, A, Z) = f(u(X), u(A), u(Z)),$$

где $u(X)$ – полезность исходов; $u(A)$ – полезность альтернатив; $u(Z)$ – полезность ситуаций.

С введением в задачу дополнительной информации о свойствах объектов и условиях обстановки полезность может существенно изменяться. Целью настоящей работы является разработка метода восстановления функции полезности по экспертным оценкам, выраженным в лингвистической форме, с учетом истинности самих высказываний. Новизна предлагаемого подхода заключается в:

- 1) введении лингвистической переменной «Истинность» для учета уверенности эксперта в своих суждениях;
- 2) формулировке оптимизационной задачи, позволяющей восстановить полиномиальную функцию полезности по конечному числу парных сравнений с нечеткими оценками.

Теория ожидаемой полезности (EUT) фон Неймана–Моргенштерна является доминирующей парадигмой принятия решений в условиях риска [6]. Однако накопленные за последние десятилетия эмпирические данные свидетельствуют о систематических нарушениях ее аксиом (парадоксы Алле и Элсберга [11]), что породило альтернативные модели – рангозависимую полезность, кумулятивную теорию перспектив и нелинейную теорию желательности [9, 12].

Для многокритериальных задач разработаны методы MAUT и MAVT. Их развитие для случая нечетких предпочтений ЛПР предложено в работе [7], где нечеткие числа используются для описания как ценности оценок по критериям, так и весов критериев. Параллельно развиваются методы анализа решений при качественных (порядковых) предпочтениях и качественных вероятностях [3, 5].

Отдельное направление составляют методы восстановления функции полезности по экспертным оценкам. Классический метод UTA [10] и его расширения (UTA-GMS, Interval UTA) используют порядковую регрессию для построения аддитивной функции полезности по парным сравнениям. Интеграция UTA со стохастическим многокритериальным анализом приемлемости (SMAA) позволяет учитывать неточность экспертных оценок.

Применение нечеткой логики и лингвистических переменных для моделирования предпочтений ЛПР подробно рассмотрено в работах [4], а также в исследованиях [1, 2] по ситуационному синтезу программного обеспечения для систем поддержки принятия решений (СППР) для ОТС.

Настоящая статья развивает указанные подходы, предлагая метод одновременного учета нечеткости предпочтений и нечеткости истинности экспертных высказываний.

Формализация постановки задачи

Рассматривается множество допустимых альтернатив A и множество исходов X . Каждой альтернативе $a \in A$ соответствует вектор критериальных оценок $X(a) \in X$. Предполагается, что на множестве исходов задана линейная упорядоченность (отношение предпочтения $\succ$), которую требуется восстановить в виде функции полезности $U: X \rightarrow [0,1]$, такой что

$$a_1 \succ a_2 \Leftrightarrow U(X(a_1)) > U(X(a_2)).$$

Функция полезности аппроксимируется полиномом степени n :

$$U(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^n C_k x^k + C_{n+1},$$

где $\mathbf{C} = (C_1, \dots, C_{n+1})$ – вектор подлежащих определению коэффициентов.

Лингвистическая модель предпочтений

В условиях многокритериальности и неопределенности ЛПР затрудняется дать численную оценку предпочтения. Для преодоления этого затруднения вводится лингвистическая переменная «Предпочтение» $\mathcal{P}$ с базовым терм-множеством:

$$T(\mathcal{P}) = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\},$$

где P_1 – сильно эквивалентно, P_2 – почти эквивалентно, P_3 – средне предпочтительнее, P_4 – значительно предпочтительнее, P_5 – сильно предпочтительнее.

В качестве базовой переменной, на которой раскрывается смысл лингвистических значений, используется величина

$$b = \frac{U_1}{U_1 + U_2}, \quad U_i = U(X(a_i)).$$

Каждому терму P_i сопоставляется функция принадлежности $\mu_{P_i}(b)$, определенная на интервале $[0,1]$. Качественный вид этих функций (треугольные и трапециевидные нечеткие множества) соответствует общепринятой практике построения нечетких моделей [4].

Таким образом, экспертное высказывание «альтернатива a_1 значительно предпочтительнее альтернативы a_2 » формализуется нечетким отношением $\mu_{P_4}(U_1/(U_1 + U_2))$.

Лингвистическая переменная «Истинность»

При практической работе с экспертами нередко возникают сомнения в достоверности отдельных высказываний. Для учета этого факта вводится лингвистическая переменная «Истинность» $\mathcal{T}$ с терм-множеством:

$$T(\mathcal{T}) = \{T_1, \dots, T_7\},$$

где значения варьируются от «абсолютно ложно» до «абсолютно истинно».

Пусть эксперт делает высказывание V : « $a_1 \succ a_2$ » с лингвистической оценкой G . Однако в действительности истинное отношение есть R . Тогда истинность высказывания V определяется как степень соответствия R и G :

$$\mu_T(\tau) = \max_{b: \tau = \mu_G(b)} \mu_R(b), \quad \tau \in [0,1].$$

Фактически каждая экспертная оценка снабжается «весом», пропорциональным степени уверенности эксперта, что позволяет повысить робастность восстанавливаемой функции полезности.

Восстановление функции полезности

Пусть получено m парных сравнений альтернатив (a_{i1}, a_{i2}) , $i = 1, \dots, m$, каждое из которых снабжено лингвистической оценкой предпочтения и лингвистической оценкой истинности τ_i . Задача восстановления функции полезности формулируется как оптимизационная.

Случай четкой истинности. Если ЛПР дал однозначную числовую оценку истинности τ_i для каждой пары, требуется найти коэффициенты $\mathbf{C}$, максимизирующие суммарную меру согласованности:

$$\sum_{i=1}^m [\tau_i U_{i1}^2 + (1 - \tau_i) U_{i2}^2 - U_{i1} U_{i2} - 1] \rightarrow \max_{\mathbf{C}},$$

при ограничениях

$$\frac{U_{i1}}{U_{i2}} > 0, \quad 0 \leq U \leq 1,$$

где $U_{i1} = U(X(a_{i1}))$, $U_{i2} = U(X(a_{i2}))$.

Случай нечеткой истинности. Если истинность задана нечеткой функцией принадлежности $\mu_{\tau_i}(\tau)$, целевая функция модифицируется:

$$\sum_{i=1}^m \int_0^1 \mu_{\tau_i}(\tau) [\tau U_{i1}^2 + (1 - \tau) U_{i2}^2 - U_{i1} U_{i2} - 1] d\tau \rightarrow \max_{\mathbf{C}}.$$

Интегрирование по τ выполняет усреднение вклада каждой пары с весом, соответствующим степени истинности высказывания.

Полученная задача относится к классу задач нелинейного программирования и может быть решена численно стандартными методами (например, градиентными или с использованием эволюционных алгоритмов).

Иллюстративный пример

Рассмотрим три альтернативы a_1, a_2, a_3 с критериальными оценками, нормированными в диапазоне $[0,1]$: $x_1 = 0.2$, $x_2 = 0.5$, $x_3 = 0.9$. Эксперт дает следующие лингвистические оценки:

- a_2 значительно предпочтительнее a_1 (истинность – «истинно», $\tau \approx 0.85$);
- a_3 средне предпочтительнее a_2 (истинность – «более или менее истинно», $\tau \approx 0.65$);
- a_3 сильно предпочтительнее a_1 (истинность – «абсолютно истинно», $\tau \approx 1.0$).

Восстанавливается полином первой степени ($n = 1$): $U(x) = C_1 x + C_2$. Решение оптимизационной задачи дает коэффициенты $C_1 \approx 0.78$, $C_2 \approx 0.08$. Нормировка обеспечивает выполнение ограничений. Итоговые полезности: $U_1 \approx 0.24$, $U_2 \approx 0.47$, $U_3 \approx 0.78$. Ранжирование $U_1 < U_2 < U_3$ полностью соответствует исходным экспертным предпочтениям.

Заключение

Предложенный метод занимает промежуточное положение между классическими методами восстановления функции полезности (UTA [10]) и полностью нечеткими подходами. С одной стороны, использование лингвистических термов снижает когнитивную нагрузку на эксперта по сравнению с точными числовыми оценками. С другой – введение переменной «Истинность» позволяет отсеивать или ослаблять влияние наименее уверенных суждений, повышая робастность итоговой функции полезности.

По сравнению с методом, изложенным в [7], где нечеткость сосредоточена на значениях критериев и весах, предлагаемый подход акцентирует нечеткость на уровне бинарных отношений предпочтения и их достоверности. Относительно методов качественного анализа [5] отличие состоит в возможности получения не только порядковой, но и количественной (кардинальной) функции полезности.

Ограничением метода является предположение о полиномиальной форме функции полезности. В случаях существенно нелинейных предпочтений может потребоваться повышение степени полинома или переход к непараметрическим представлениям.

Таким образом, в статье предложен метод восстановления функции полезности, основанный на совместном использовании лингвистических оценок предпочтений и лингвистической переменной «Истинность». Метод сводится к решению оптимизационной задачи нелинейного программирования. Приведенный иллюстративный пример демонстрирует согласованность получаемых результатов с исходными экспертными оценками.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на:

- экспериментальную верификацию метода на реальных задачах управления ОТС;
- сравнение с методами UTA-GMS и SMAA по критериям точности и устойчивости;
- распространение подхода на многомерные функции полезности и нелинейные агрегирующие операторы (интеграл Шоке).

Список литературы

1. Балашов О.В., Букачев Д.С. Об одном способе формализованного представления ситуаций и задач // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2023. – Т. 8, № 9(35). – С. 30–36.
2. Балашов О.В., Букачев Д.С. Ситуативный синтез программного обеспечения, моделирующего принимаемые человеком решения на объектах социально-экономических систем // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2025. – Т. 10, № 3(53). – С. 107–116.
3. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. – М.: Физматлит, 1996. – 208 с.
4. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
5. Нелюбин А.П., Подиновский В.В. Метод анализа решений в условиях неопределенности при качественном оценивании предпочтений и вероятностей // Докл. РАН. Матем., информ., проц. упр. – 2025. – Т. 524. – С. 47–50.
6. Фишберн П.С. Теория полезности для принятия решений. – М.: Наука, 1972. – 352 с.

7. Шакиров В.А. Многокритериальная оценка альтернатив на основе теории полезности в условиях неопределенности предпочтений лица, принимающего решения // Нечеткие системы и мягкие вычисления. – 2018. – Т. 13, № 1. – С. 17–35.
8. Шеридан Т.Б., Феррелл У.Р. Системы человек-машина. – М.: Машиностроение, 1980. – 400 с.
9. Gilboa I. Decision Under Uncertainty: State of the Science // Annual Review of Economics. – 2025. – Vol. 17. – pp. 1–30.
10. Jacquet-Lagrange E., Siskos J. Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making: the UTA method // European Journal of Operational Research. – 1982. – Vol. 10, No. 2. – pp. 151–164.
11. Kuzmics C., Rogers B.W., Zhang X. An Ellsberg paradox for ambiguity aversion // arXiv preprint. – 2023.
12. L'Haridon O. et al. Measuring uncertainty preferences: what we know and what we need // The Geneva Risk and Insurance Review. – 2025. – Vol. 50. – pp. 119–135.

References

1. Balashov O.V., Bukachev D.S. Ob odnom sposobe formalizovannogo predstavleniya situacij i zadach // Mezhdunarodny`j zhurnal informacionny`x texnologij i e`nergoe`ffektivnosti. – 2023. – Т. 8, № 9(35). – pp. 30–36.
2. Balashov O.V., Bukachev D.S. Situativny`j sintez programmnoho obespecheniya, modeliruyushhego prinimaemy`e chelovekom resheniya na ob`ektax social`no-e`konomicheskix sistem // Mezhdunarodny`j zhurnal informacionny`x texnologij i e`nergoe`ffektivnosti. – 2025. – Т. 10, № 3(53). – pp. 107–116.
3. Larichev O.I., Moshkovich E.M. Kachestvenny`e metody` prinyatiya reshenij. – М.: Fizmatlit, 1996. – p.208
4. Melikov A.N., Bershtejn L.S., Korovin S.Ya. Situacionny`e sovetuyushhie sistemy` s nechetkoj logikoj. – М.: Nauka, 1990. – p. 272
5. Nelyubin A.P., Podinovskij V.V. Metod analiza reshenij v usloviyax neopredelennosti pri kachestvennom ocenivanii predpochtenij i veroyatnostej // Dokl. RAN. Matem., inform., procz. upr. – 2025. – Т. 524. – pp. 47–50.
6. Fishbern P.S. Teoriya poleznosti dlya prinyatiya reshenij. – М.: Nauka, 1972. – p.352
7. Shakirov V.A. Mnogokriterial`naya ocenka al`ternativ na osnove teorii poleznosti v usloviyax neopredelennosti predpochtenij licza, primayushhego resheniya // Nechetkie sistemy` i myagkie vy`chisleniya. – 2018. – Т. 13, № 1. – pp. 17–35.
8. Sheridan T.B., Ferrell U.R. Sistemy` chelovek-mashina. – М.: Mashinostroenie, 1980. – p.400
9. Gilboa I. Decision Under Uncertainty: State of the Science // Annual Review of Economics. – 2025. – Vol. 17. – pp. 1–30.
10. Jacquet-Lagrange E., Siskos J. Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making: the UTA method // European Journal of Operational Research. – 1982. – Vol. 10, No. 2. – pp. 151–164.
11. Kuzmics C., Rogers B.W., Zhang X. An Ellsberg paradox for ambiguity aversion // arXiv preprint. – 2023.

Балашов О.В., Букачев Д.С. Способ восстановления функции полезности на основе лингвистических оценок предпочтений и истинности для принятия решений в организационно-технических системах // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2026. – Т. 11 № 5(67) Ч.1 с. 117 – 123

12. L'Haridon O. et al. Measuring uncertainty preferences: what we know and what we need // The Geneva Risk and Insurance Review. – 2025. – Vol. 50. – pp. 119–135.
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 621.336.3

ПОЧЕМУ ТОКОСЪЕМНИК НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ НЕ МОЖЕТ ИМЕТЬ ОКРУГЛУЮ ФОРМУ?

Аленин А.С.

ФГАОУ ВО "РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА", Москва, Россия
(127055, город Москва, ул. Образцова, д.9 стр.9), e-mail: payday2.1997@mail.ru

Представленная статья посвящена обзору причин, препятствующих созданию графитовых вставок токоприемников на электровозах округлых и круглых форм, поперечных движению электровоза. В предлагаемой статье описываются некоторые возможные варианты исполнения токоприемников электровозом описываемых форм. Так же разбираются недостатки и преимущества круглых токоъемных элементов при использовании их на железнодорожном транспорте.

В заключении будут подведены итоги проделанной работы, и описаны возможности реальной реализации токоъемников круглых и округлых форм в настоящее время на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: Токоприемник электровоза, электрическая дуга, пробой воздушных промежутков, дуговая эрозия.

WHY CAN'T A CURRENT COLLECTOR ON ELECTRIC LOCOMOTIVES HAVE A ROUNDED SHAPE?

Alenin A.S.

"RUSSIAN UNIVERSITY OF TRANSPORT", Moscow, Russia (127055, Москва, ул. Obratsova, d.9
bld.9), e-mail: payday2.1997@mail.ru

The presented article is devoted to an overview of the reasons preventing the creation of graphite inserts of pantographs on electric locomotives of rounded and round shapes, transverse to the movement of the electric locomotive. The proposed article describes some possible versions of electric locomotive pantographs of the described shapes. The disadvantages and advantages of round current-removing elements when used in railway transport are also analyzed.

In conclusion, the results of the work done will be summarized, and the possibilities of the actual implementation of current collectors of round and rounded shapes in railway transport will be described.

Keywords: Electric locomotive pantograph, electric arc, breakdown of air gaps, arc erosion.

Электроподвижной состав (ЭПС) — будь то современный электровоз или скоростной электропоезд — не сдвинется с места без постоянного притока электроэнергии. Ключевую роль в этом процессе играет токоприемник. Именно он обеспечивает физическую связь между контактным проводом, подвешенным над путями, и силовыми агрегатами локомотива.

В наши дни на железных дорогах встречаются токоприемники со скользящим контактом. Их конструкция напоминает сложный механизм-«пантограф», состоящий из системы рычагов, более подробно структура пантографа описана в [2]. Эти рычаги прижимают к контактному проводу (КП) специальную графитовую вставку (токоъемник). Графит выбран не случайно: он хорошо проводит ток и медленно изнашивается. Помимо рычагов, в конструкцию входят

изоляторы и гибкие провода, которые передают полученную энергию дальше — к выпрямителям и двигателям поезда.

Традиционный метод, когда графитовая вставка просто скользит по проводу, имеет свои недостатки, связанные с износом. Поэтому предлагается принципиально новая идея: заменить скольжение на качение.

Суть инновации заключается в том, чтобы вместо полоза с графитовой вставкой использовать графитовое колесо (барабан). Оно будет катиться по контактному проводу, что должно значительно снизить трение и износ как самого провода, так и токосяемного элемента. При этом привычная система рычагов, отвечающая за силу прижатия к проводу, сохраняется. Само колесо предлагается установить на подшипниках и закрепить на раме токоприемника (пантографа). Такая конструкция в упрощенном виде представлена ниже на Рисунке 1.

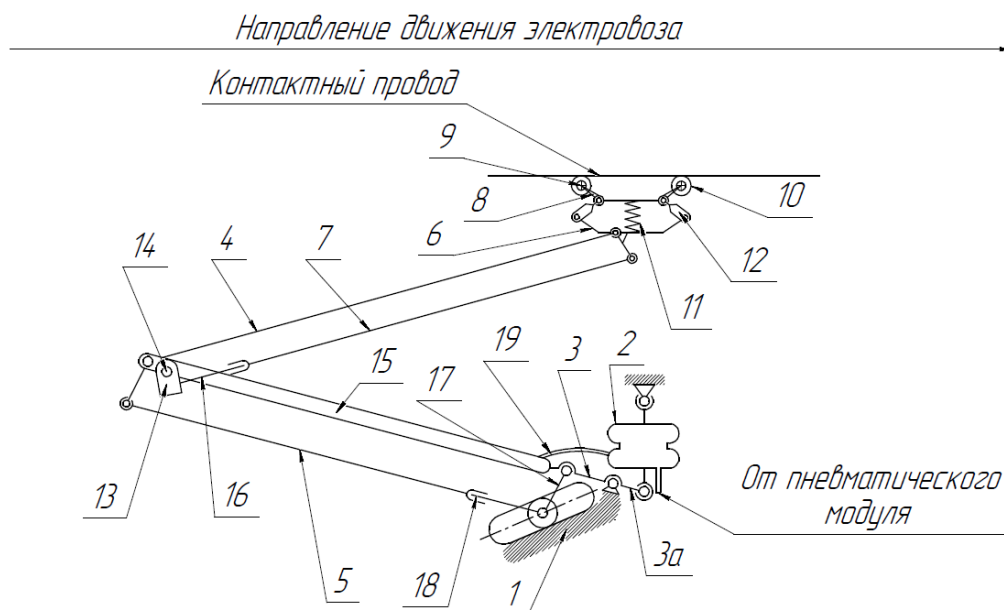


Рисунок 1 – Упрощенная схема пантографа с круглым токосяемником

1 – основание, 2- пневмопривод, 3- несущий рычаг, 3а – малое плечо несущего рычага, 4 – верхняя рама, 5 – нижняя тяга, 6 – каретка, 7 – синхронизирующая тяга, 8 – держатель, 9 – крепление подшипника токосяемника к держателю, 10 – графитовый барабан, 11 – пружина, 12 – тяги каретки, 13 – механизм аварийного опускания, 14 – ось, 15 – труба несущего рычага, 16 – шток, 17 – тяга кулисы, 18 – шпилька, 19 – резиновый рукав

Ограничивая текст данной статьи лишь теоретическими предположениями, перейдем к непосредственным плюсам предложенного токоприемника:

1) Уже не первое столетие известно, что трение качения намного меньше трения скольжения, подробнее о расчете трений скольжения качения написано в [4], поэтому катить графитовую вставку по КП намного легче с точки зрения сил возникающих при движении ЭПС.

2) Рассматривая вопрос об износе вставок токоприемника, замена принципа скольжения на качение имеет смысл, ведь при скольжении графитовой вставки, главное сопротивление этому процессу возникает в трении между графитом и материалом контактного провода, поэтому применяя качение токосяемника по КП можно снизить износ графита и продлить срок технического обслуживания.

Однако несмотря на вышеописанные положительные стороны, у предлагаемой системы существуют недостатки, которые описаны ниже:

1) Несмотря на преимущества качения, у этой конструкции есть существенный недостаток, связанный с физикой электрического контакта. Пантограф создаёт постоянное прижимное усилие, но из-за круглой формы графитового барабана добиться идеального прилегания к плоскому контактному проводу (КП) невозможно.

Как видно из иллюстрации (Рисунок 2), в точке (А) расстояние между проводом и поверхностью токосяемника (δ) увеличивается. Поскольку катящийся токоприёмник имеет две такие точки, находящиеся от места контакта токосяемника и КП слева и справа соответственно, то и электрическая дуга будет возникать в двух точках. В эти моменты контакт становится прерывистым и поскольку современные электропоезда потребляют значительную мощность, даже микроскопического зазора достаточно для возникновения воздушного пробоя. Этот единичный пробой в дальнейшем перерастает в электрическую дугу.

Постоянное возникновение и гашение такой дуги приводит к разрушительному явлению, называемому дуговой эрозией. Материал графитового барабана буквально выгорает и испаряется под воздействием высоких температур, это называется электрическим износом токоприёмника [5]. Это вызывает ускоренный износ токоприёмника и резко снижает общую надёжность всего узла.

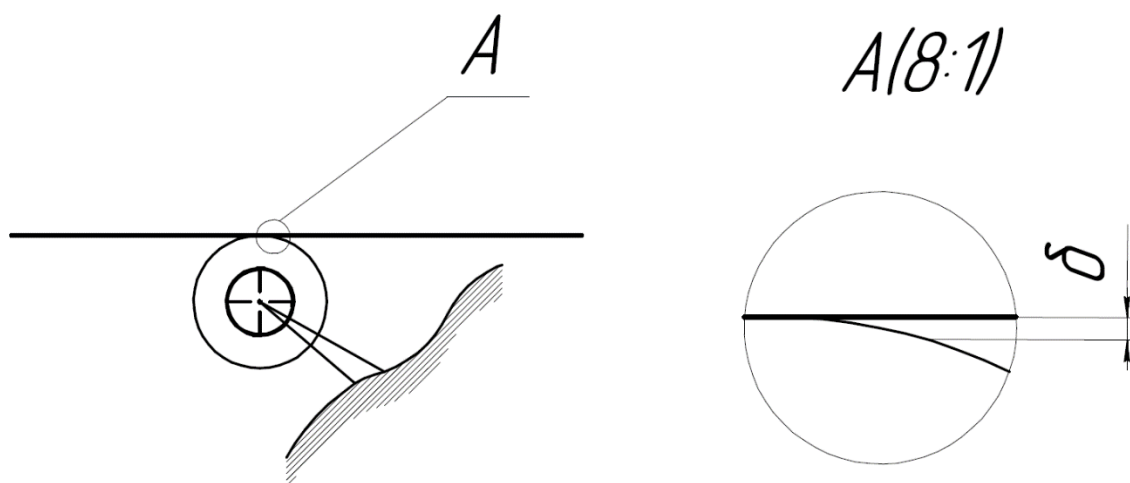


Рисунок 2 – Места возникновения дуги у катящегося токоприёмника

2) Постоянно возникающая и гаснущая электрическая дуга — это не просто локальное разрушение материалов. Она становится мощным источником электромагнитного излучения.

Это излучение будет создавать значительные помехи для всех смежных линий связи, проходящих вдоль железной дороги (например, проводов СЦБ и связи). В современной технике это явление называют электромагнитной несовместимостью.

Для защиты чувствительного оборудования от таких помех потребуются дорогостоящие меры. Это неизбежно приведёт к существенному удорожанию инфраструктуры, так как придётся устанавливать специальные экраны и системы защиты на всех линиях связи, проходящих вблизи контактной сети. Таким образом, экономические затраты на обслуживание и защиту инфраструктуры могут значительно превысить любую потенциальную выгоду от новой конструкции.

3) Помимо технических сложностей, существует и чисто экономический фактор. Для обеспечения необходимой площади контакта с проводом круглый барабан должен быть значительно массивнее, чем плоский полоз.

Это напрямую связано с понятием материалоемкости: на изготовление токоприёмника такой формы потребуется гораздо больше дорогостоящего графита и металла. Следовательно, это неизбежно приведёт к существенному удорожанию как самого изделия, так и его последующего обслуживания.

Так же увеличение габаритов неизбежно ведёт к утяжелению конструкции. Более тяжёлый токоприёмник создаёт повышенную нагрузку на механизм подъёма и на саму контактную сеть. Это, в свою очередь, усложняет всю механическую часть и оснастку, делая систему более громоздкой, дорогой и менее надёжной.

4) Постоянно горящая электрическая дуга представляет собой серьёзную угрозу не только для самого токоприёмника, но и для всей инфраструктуры контактной сети.

Поэтому предлагаемая концепция токоъемника обладает примерно соизмеримым механическим износом по сравнению с используемыми плоскими токоприемниками, и завышенным значением электрического износа [5].

Под воздействием экстремальных температур дуги происходит эрозия материала: металл контактного провода буквально испаряется. В лучшем случае это приведёт к ускоренному износу проводов, что потребует их более частой и дорогостоящей замены.

Однако последствия могут быть гораздо серьёзнее. Дуга локально ослабляет структуру металла, снижая его механическую прочность. Это создаёт риск обрыва контактного провода. Обрыв подвески на железной дороге — это критическая ситуация, которая напрямую угрожает безопасности движения поездов и может привести к серьёзным авариям.

Для перехода от теоретической модели к настоящим исследованиям можно воспользоваться упрощенной системой с использованием линейного стенда для исследования взаимодействия токоприемника с контактным проводом. Более подробно о данном стенде можно прочесть в одноименном патенте Сидорова, Чертова, Смердина и Москалюка [1]. Использование лабораторных стендов для проведения тестов, позволит снизить удельные экономические затраты на каждый поставленный опыт, что в широкой перспективе ведет к ускоренному подтверждению, или опровержению приведенных выше теоретических высказываний.

Так же допускается использование компьютерных моделей, созданных при помощи программного обеспечения MatLab. Для этого можно воспользоваться моделью, предложенной Омским государственным университетом путей сообщений [3]. Данный способ проверки вышеуказанных предположений является самым экономически эффективным, но также и наиболее интеллектуально требовательным, поскольку указанная выше компьютерная модель не имеет заранее расписанных параметров. Но проведение компьютерных испытаний дает возможность регулируя входные данные с исследуемого токоъемника, отыскать наиболее подходящую форму по сочетанию экономических затрат, скорости износа токоъемника и итоговой массе изделия.

Несмотря на кажущуюся привлекательность идеи, создание токоприёмника с принципом качения наталкивается на фундаментальные физические препятствия, которые на современном этапе развития науки и техники выглядят непреодолимыми.

Основная проблема заключается в электрической дуге. Даже в классических токоприёмниках со скользящим контактом возникновение дуги — явление крайне нежелательное, так как оно приводит к ускоренному износу графитовых вставок. В конструкции с катящимся колесом этот эффект будет проявляться постоянно.

Таким образом, использование округлых форм (колёс, барабанов) для токосяема при таких колоссальных нагрузках на данном этапе развития материаловедения выглядит скорее как техническая фантазия, нежели как реальное инженерное решение. Современные знания о разрушительном воздействии электрической дуги делают этот путь неперспективным.

Список литературы

1. Патент № 2781217 С1 Российская Федерация, МПК В60L 5/18, В60М 1/18, G01М 17/08. Линейный стенд для исследования взаимодействия токоприемника с контактным проводом : № 2022110159 : заявл. 13.04.2022: опубл. 07.10.2022 / О. А. Сидоров, М. С. Михайлов, А. В. Тарасенко, А. Н. Смердин, заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения".
2. Патент № 2593180 С2 Российская Федерация, МПК В60L 5/22, В60L 5/26, В60L 5/32. Пантограф для железнодорожных транспортных средств : № 2013146604/11 : заявл. 17.04.2012 : опубл. 27.07.2016 / Ж. П. Массат.
3. Аркашев А. Е., Ларькин И. В. Моделирование взаимодействия токоприемника и контактной подвески с учетом отрывов полоза от контактного провода // Известия Транссиба. 2011. №3 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-vzaimodeystviya-tokopriemnika-i-kontaktnoy-podveski-s-uchetom-otryvov-poloza-ot-kontaktnogo-provoda> (дата обращения: 28.04.2026).
4. Севрюков П. Ф. Трение качения и трение скольжения //«Физика»: приложение к газете «1 сентября»,. – 2005. – С. 35.
5. Токосяемные вставки для токоприемников железнодорожного транспорта / И. С. Гершман, Н. В. Миронос, М. А. Мельник, Е. И. Гершман // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2012. – № 4. – С. 3-10.

References

1. Patent No. 2781217 C1 Russian Federation, IPC B60L 5/18, B60M 1/18, G01M 17/08. Linear test bench for studying the interaction of a pantograph with a contact wire : No. 2022110159 : application 13.04.2022: published 07.10.2022 / O. A. Sidorov, M. S. Mikhailov, A.V. Tarasenko, A. N. Smerdin ; applicant Federal State budgetary educational institution of higher education "Omsk State University of Railway Transport".
2. Patent No. 2593180 C2 Russian Federation, IPC B60L 5/22, B60L 5/26, B60L 5/32. Pantograph for railway vehicles : No. 2013146604/11: application 17.04.2012 : published 27.07.2016 / J. P. Massat.
3. Arkashev A. E., Larkin I. V. Modeling the interaction of a pantograph and a contact suspension, taking into account the separation of the skid from the contact wire // Izvestiya Transsib. 2011. No. 3 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-vzaimodeystviya-tokopriemnika-i-kontaktnoy-podveski-s-uchetom-otryvov-poloza-ot-kontaktnogo-provoda> (date of request: 04/28/2026).

4. Sevryukov P. F. Rolling friction and sliding friction //"Physics": appendix to the newspaper "September 1", 2005, pp. 35.
 5. Current-removing inserts for current collectors of railway transport / I. S. Gershman, N. V. Mironos, M. A. Melnik, E. I. Gershman // Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport. - 2012. – No. 4. – pp. 3-10.
-



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 621.039.61

ТОКАМАК КАК ОСНОВА УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА: УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП РАБОТЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ

¹Хайруллина Л.М., ²Фаизов М.Р.

ФГБОУ ВО "КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА-КАИ", Казань, Россия (420111, Республика Татарстан, город Казань, ул. Карла Маркса, д. 10), e-mail: ¹lx30.78@mail.ru, ²d.i.v.a.2005@mail.ru

В представленной статье осуществляется фундаментальный и всесторонний анализ токамака как ключевой установки для практического воплощения управляемого термоядерного синтеза. Детально исследованы базовые физические принципы магнитного удержания плазмы, а также проанализированы передовые конструктивные решения современных и перспективных реакторов, включая ИТЭР, Т-15МД, EAST и CFETR. Особый акцент сделан на критических инженерных и физических проблемах, среди которых выделяются экстремальные тепловые нагрузки на материалы обращенных к плазме компонентов, магнитогидродинамические неустойчивости и физика краевой плазмы. Тщательно изучены результаты недавних дейтерий-тритиевых экспериментов на европейском токамаке JET, раскрывающие природу изотопных эффектов и влияние альфа-частиц на параметры плазменного шнура. Рассмотрены инновационные подходы к диагностике, такие как применение алгоритмов машинного обучения для предсказания срывов плазмы и использование высокотемпературных сверхпроводников. На основании проведенного исследования сделан вывод о закономерном смещении мирового научного фокуса от чисто теоретической физики удержания к инженерно-технологическому этапу проектирования коммерческих электростанций.

Ключевые слова: управляемый термоядерный синтез, токамак, магнитное удержание плазмы, ИТЭР, плазменно-стенковое взаимодействие, тепловые нагрузки, магнитогидродинамическая неустойчивость, дейтерий-тритиевая плазма.

TOKAMAK AS THE BASIS OF CONTROLLED THERMONUCLEAR FUSION: DEVICE, OPERATING PRINCIPLE, AND MODERN IMPLEMENTATION PROBLEMS

¹Khairullina L.M., ²Faizov M.R.

KAZAN NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY. A.N. TUPOLEVA-KAI", Kazan, Russia (420111, Republic of Tatarstan, Kazan, Karl Marx st., 10), e-mail: ¹lx30.78@mail.ru, ²d.i.v.a.2005@mail.ru

This article provides a fundamental and comprehensive analysis of the tokamak as the key facility for the practical implementation of controlled thermonuclear fusion. The basic physical principles of magnetic plasma confinement are studied in detail, and the advanced design solutions of modern and prospective reactors, including ITER, T-15MD, EAST, and CFETR, are analyzed. Special emphasis is placed on critical engineering and physical problems, notably extreme thermal loads on plasma-facing components, magnetohydrodynamic instabilities, and edge plasma physics. The results of recent deuterium-tritium experiments on the European JET tokamak, revealing the nature of isotopic effects and the influence of alpha particles on plasma parameters, are thoroughly examined. Innovative diagnostic approaches are considered, such as applying machine learning algorithms to predict plasma

disruptions and utilizing high-temperature superconductors. Based on the research, it is concluded that the global scientific focus is naturally shifting from purely theoretical confinement physics to the engineering and technological stage of designing commercial power plants.

Keywords: Controlled thermonuclear fusion, tokamak, magnetic plasma confinement, ITER, plasma-wall interaction, heat loads, magnetohydrodynamic instability, deuterium-tritium plasma.

Современная глобальная энергетическая парадигма претерпевает кардинальные изменения, продиктованные неумолимым истощением традиционных углеводородных ресурсов и нарастающей угрозой климатических катастроф. Переход к устойчивым и возобновляемым источникам энергии является приоритетной задачей для человечества, однако нестабильность солнечной и ветровой генерации требует наличия мощного, экологически чистого источника базовой электрической нагрузки. В этом контексте управляемый термоядерный синтез (УТС) легких ядер выступает как наиболее перспективное долгосрочное решение. Процесс слияния изотопов водорода — дейтерия и трития — способен обеспечить беспрецедентный выход энергии при минимальном экологическом следе. Из всех предложенных за последние десятилетия концепций магнитных ловушек именно токамак (тороидальная камера с магнитными катушками) доказал свою жизнеспособность и подошел вплотную к порогу энергетической рентабельности. [1] Развитие технологий токамаков эволюционировало от небольших лабораторных установок до колоссальных международных проектов, требующих высочайшего уровня инженерной и научной кооперации. Данная работа призвана комплексно осветить физико-техническое устройство токамаков, механизмы их функционирования, а также глубоко проанализировать современный пласт проблем и передовых исследований, направленных на создание первого коммерческого термоядерного реактора.

Фундаментальная суть управляемого термоядерного синтеза заключается в воссоздании процессов, непрерывно протекающих в недрах звезд. [2] Для того чтобы ядра дейтерия и трития преодолели кулоновское отталкивание и вступили в реакцию слияния с выделением гелия-4 и высокоэнергичного нейтрона (14,1 МэВ), вещество необходимо нагреть до астрономических температур — порядка 100–150 миллионов градусов Цельсия. При таких температурах газ полностью ионизируется, переходя в состояние высокотемпературной плазмы. Однако сам по себе нагрев недостаточен: для получения положительного выхода энергии необходимо, чтобы плазма удерживалась в ограниченном объеме достаточно время. Это условие описывается знаменитым критерием Лоусона, который связывает плотность плазмы, ее температуру и время удержания энергии [8, с. 2].

Преимущество термоядерного синтеза перед традиционными химическими источниками топлива наглядно демонстрируется при сопоставлении их энергетической плотности. В Таблице 1 представлены сравнительные данные по выделению энергии из различных видов топлива.

Таблица 1 – Сравнение плотности энергии различных источников [8, с. 3]

Источник энергии	Энергетическая плотность (МДж/кг)	Выбросы CO ₂ (кг CO ₂ /кВт·ч)
Уголь	24	0.91
Нефть	44	0.77
Природный газ	55	0.45
Деление (Уран-235)	88 000 000	0.005
Синтез (Дейтерий-Тритий)	330 000 000	0

Как видно из представленных цифр, термоядерная реакция D-T смеси превосходит сжигание угля по энерговыделению более чем в 10 миллионов раз, при этом полностью исключая прямые выбросы углекислого газа. Для удержания столь энергонасыщенной субстанции, которая мгновенно испарила бы стенки любого материального сосуда, используется концепция магнитной изоляции.[3]

Токамак представляет собой замкнутую вакуумную камеру тороидальной формы (в виде бублика), окруженную сложной системой электромагнитов. Магнитное поле в токамаке имеет спиралевидную структуру, которая формируется за счет сложения двух компонентов. Тороидальное магнитное поле создается внешними катушками, опоясывающими камеру, в то время как полоидальное поле возникает за счет мощного электрического тока, протекающего непосредственно по самой плазменному шнуру. Ток в плазме индуцируется центральным соленоидом, работающим по принципу первичной обмотки трансформатора, где плазма выступает в роли вторичного витка. Наглядное представление архитектуры данной установки демонстрируется на Рисунке 1.

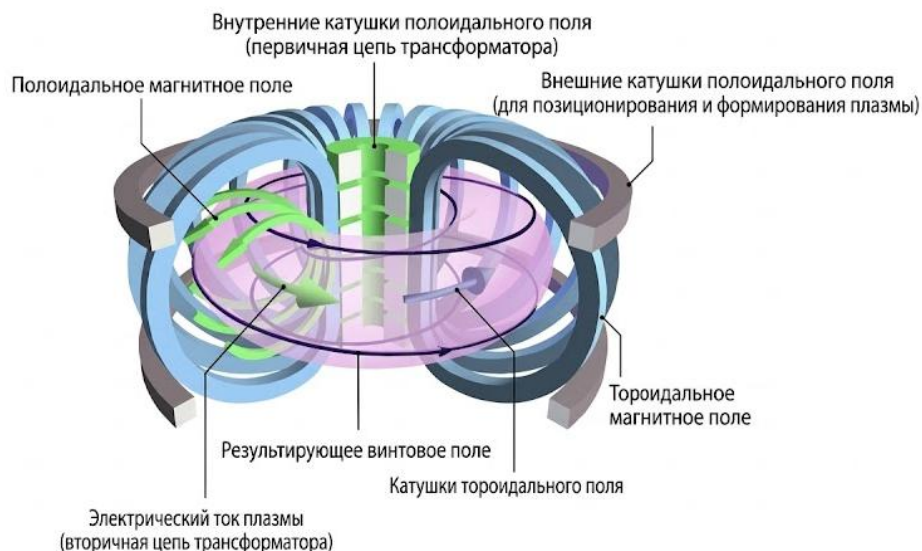


Рисунок 1 - Схема токамака с обозначением ключевых компонентов магнитной системы [8, с. 6]

Неотъемлемой частью работы токамака является система нагрева плазмы. Первоначальный омический нагрев, обусловленный протеканием тока по шнуру, быстро теряет свою эффективность по мере роста температуры, так как сопротивление плазмы при этом падает. Поэтому современные реакторы полагаются на мощные системы дополнительного нагрева. В частности, широкое распространение получила инжекция высокоэнергичных нейтральных атомов (ИНП). [4] Опираясь на результаты исследований, проведенных на отечественном токамаке ТУМАН-3М, можно утверждать, что тангенциальная инжекция пучков нейтральных атомов водорода или дейтерия с энергией 15–24 кэВ выступает не только эффективным инструментом повышения температуры, но и внешним источником генерации вращательного момента плазмы [4, с. 46]. Направление инжекции (по току плазмы или навстречу ему) оказывает радикальное влияние на формирование радиального электрического поля. Моделирование в кодах ASTRA и NUBEAM показало, что генерация сильного градиента электрического поля на периферии шнура способствует подавлению микротурбулентности и облегчает переход установки в режим улучшенного удержания (L-N переход).[5]

Помимо ИНП, важнейшую роль играют методы высокочастотного нагрева, такие как электронно-циклотронный (ЭЦН) и ионно-циклотронный резонансный нагрев (ИЦН). Эти системы позволяют не только точно вкладывать энергию в заданные области плазменного шнура, но и управлять профилем тока, подавляя развитие опасных магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей.

Однако удержание разогретой плазмы неразрывно связано с колоссальными нагрузками на обращенные к плазме компоненты (ОКП) вакуумной камеры. Наиболее уязвимым узлом реактора является дивертор — специальное устройство, расположенное в нижней (а иногда и в верхней) части камеры, предназначенное для откачки продуктов реакции (гелиевой золы) и примесей. Согласно расчетам для строящегося во Франции международного реактора ИТЭР (ITER), проектная мощность которого составляет 500 МВт при затрачиваемых 50 МВт, дивертор должен непрерывно отводить стационарные тепловые потоки порядка 20 МВт/м². Но настоящей проблемой становятся нестационарные процессы: краевые локализованные моды (ELM) и большие срывы плазмы (disruptions) [7, с. 1]. При срывах тепловая энергия плазмы (термальный квенч), оцениваемая для ИТЭР в 120–175 МДж, выбрасывается на стенки за считанные миллисекунды.

В таких экстремальных условиях вольфрам, выбранный в качестве материала диверторных пластин благодаря своей тугоплавкости и стойкости к распылению, подвергается мгновенному плавлению и абляции. Исследователи А. Hassanein и V. Sizyuk подробно описывают эффект формирования экранирующего парового облака (вторичной плазмы). Попадающие на дивертор частицы горячей плазмы испаряют тонкий слой вольфрама, образуя плотное облако с концентрацией частиц порядка 10^{17} см⁻³ (в то время как плотность основной плазмы составляет около 10^{14} см⁻³). Эта вторичная плазма поглощает остаточную энергию удара, защищая дивертор от более глубокого разрушения. [6] Однако она же становится мощнейшим источником жесткого фотонного излучения, которое

распространяется изотропно и способно нанести критический ущерб скрытым компонентам камеры, не рассчитанным на столь высокие лучистые нагрузки [7, с. 3]. Более того, расчеты, приведенные исследователями А. Масуди и соавторами, показывают, что вертикальные смещения плазмы (VDE) могут генерировать локальные нагрузки до 60 МДж/м² на протяжении 100–300 мс, вызывая необратимую деградацию материала, растрескивание и образование металлической пыли, недопустимой по соображениям радиационной безопасности [9, с. 181].

Для минимизации этих нагрузок ученые исследуют процессы формирования газовой подушки (detachment) в диверторном объеме. [7] Ценные фундаментальные данные в этой области получены на российском сферическом токамаке Глобус-М2. Благодаря компактной геометрии (большой радиус 0.36 м, малый 0.24 м) исследователям удалось зафиксировать уникальное явление — формирование области высокой электронной плотности (HFSHD) во внутреннем диверторе со стороны сильного магнитного поля. Применение диагностики диверторного томсоновского рассеяния показало, что плотность плазмы в этой узкой зоне может превышать плотность на экваториальной плоскости в несколько раз, что открывает новые пути к управлению теплоотводом за счет усиления радиационных потерь в холодной пристеночной плазме [1, с. 24-25].

Переходя от инженерии стенок к физике самой термоядерной реакции, следует подчеркнуть, что поведение дейтерий-тритиевой смеси существенно отличается от чистой дейтериевой плазмы, на которой проводится большинство рутинных экспериментов. Ключевой вехой в понимании этих различий стали недавние рекордные кампании DTE2 (2021 г.) и DTE3 (2023 г.) на европейском токамаке JET. J. Garcia в своем всеобъемлющем обзоре отмечает, что в ходе DTE2 был надежно зафиксирован эффект самонагрева плазмы альфа-частицами [6, с. 23]. В отличие от пучков ИНП, которые передают значительную долю энергии ионам и закручивают плазму, альфа-частицы рождаются изотропно с огромной энергией 3.5 МэВ и отдают свое тепло преимущественно электронам. Это приводит к существенному изменению профилей электронной и ионной температур.[8]

Более того, сверх-альфвеновские скорости продуктов синтеза инициируют резонансное возбуждение тороидальных альфвеновских собственных мод (ТАЕ). В экспериментах на JET было наглядно показано, что эти электромагнитные возмущения способны приводить к аномальному выбросу быстрых ионов из центральной зоны реактора до того, как они термализуются и передадут свою энергию основному газу. Во время кампании DTE3 на установке JET удалось достичь абсолютного исторического рекорда по выходу термоядерной энергии — 69 МДж в режиме с обогащением тритием, что в 18 раз превышает показатели, достигнутые при лазерном инерциальном синтезе на американской установке NIF в 2022 году [11, с. 3]. Как отмечает E.R. Solano, анализ этих разрядов выявил сложный изотопный эффект: плазма с добавлением трития демонстрирует улучшенное удержание энергии по сравнению с дейтериевой, однако порог перехода в H-режим и динамика краевых мод (ELM) меняются нелинейно, требуя филигранной настройки систем газонапуска и нагрева для предотвращения накопления распыленного со стенок вольфрама в ядре плазмы [11, с. 19-20].

Обеспечение стабильности горения плазмы невозможно без сверхточных систем диагностики и упреждающего контроля. Для регистрации МГД-возмущений традиционно используются массивы магнитных зондов (зондов Мирнова). В работе исследователей из НИЦ

«Курчатовский институт» А.Д. Изаровой и соавторов представлен глубокий анализ сигналов с 39 стационарных магнитных зондов новейшего российского токамака Т-15МД. Особенность этой установки — вытянутое D-образное сечение вакуумной камеры, что делает классические методы одномерного фурье-разложения неэффективными из-за сильной асимметрии амплитуды и фазы регистрируемых колебаний [2, с. 351-352]. Авторы успешно внедрили комплексный математический аппарат, сочетающий метод разложения по сингулярным значениям (SVD) для фильтрации шумов с преобразованием Гильберта и построением пространственно-временных фазовых матриц. Это позволило безошибочно определять полоидальные волновые числа развивающихся магнитных островов, что было верифицировано независимыми многохордовыми измерениями мягкого рентгеновского излучения (SXR).

Динамичное усложнение систем управления реактором неизбежно привело к интеграции в термоядерные исследования технологий искусственного интеллекта (ИИ). Масштабное библиометрическое и патентное исследование, проведенное H.J. Chang и S.W. Wang, наглядно демонстрирует, что начиная с 2020 года вектор глобальных публикаций резко сместился от фундаментальной плазменной теории к прикладным алгоритмам ИИ и разработке высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [5, с. 25-26]. В частности, нейросетевые архитектуры (например, многослойные персептроны и сверточные нейросети), обучаемые на колоссальных базах данных исторических срывов плазмы, сегодня способны предсказывать фатальные потери удержания за сотни миллисекунд до их визуального проявления. Как указывают Е. Peluso и коллеги, использование моделей глубокого обучения снижает количество ложных срабатываний и дает автоматике драгоценное время для инъекции криогенных пеллет или массивного газового напуска для мягкого гашения разряда, сохраняя целостность бериллиевых и вольфрамовых облицовок [10, с. 2].

Внедрение ВТСП-технологий, в свою очередь, открывает путь к созданию компактных реакторов с экстремально сильным магнитным полем. Мировая гонка технологий УТС сегодня опирается на реализацию нескольких стратегических мегапроектов. В России, в рамках национального проекта по развитию атомной энергетики (РТТН), взят курс на создание передовой экспериментальной базы. Как подчеркивает В.И. Ильгисонис, физический пуск токамака Т-15МД в 2021 году стал важнейшим шагом на пути к масштабной цели — проектированию Токамака реакторных технологий (ТРТ) [3, с. 964]. Интересной особенностью российской концепции является фокус на разработку гибридных термоядерных реакторов, где D-T плазма выступает не только источником тепла, но и мощнейшим генератором нейтронов для трансмутации сырьевых изотопов в делящееся топливо для атомных станций, что позволяет элегантно замкнуть ядерный топливный цикл.

Параллельно поразительные темпы развития демонстрирует Китай. Токамак EAST стал первой в мире полностью сверхпроводящей машиной, на которой последовательно устанавливаются мировые рекорды удержания: 120 миллионов градусов в течение 101 секунды и поддержание стабильного H-режима на протяжении 1056 секунд [12, с. 4]. Китайская программа обладает четкой дорожной картой, венцом которой должно стать строительство инженерного испытательного реактора CFETR (радиус 7.2 м, магнитное поле 6.5 Т, ток плазмы 14 МА), призванного продемонстрировать непрерывную генерацию 1 ГВт мощности и самообеспечение тритием за счет размножения нейтронов в blankets. CFETR

позиционируется как недостающее звено между экспериментальным ИТЭР и первой промышленной электростанцией DEMO [12, с. 8].

В заключение, проведенный всесторонний анализ современных научных исследований, экспериментальных данных и патентной аналитики со всей очевидностью подтверждает, что токамак является наиболее технологически зрелой и реализуемой концепцией для овладения энергией управляемого термоядерного синтеза. Сегодня мировое термоядерное сообщество преодолело экватор фундаментальных физических изысканий и вступило в фазу решения критических инженерных и материаловедческих задач. Центральным вызовом на пути к коммерциализации термоядерной энергии остается проблема обеспечения живучести компонентов первой стенки и дивертора в условиях экстремальных стационарных и ударных тепловых нагрузок. Успешный опыт дейтерий-тритиевых кампаний на установке JET доказал принципиальную возможность получения десятков мегаджоулей энергии, но одновременно обнажил сложную физику поведения альфа-частиц и изотопных эффектов. Ответом на эти вызовы становится симбиоз передовых производственных технологий, таких как высокотемпературные сверхпроводники, и цифровых решений на базе искусственного интеллекта для предиктивного контроля плазмы. Беспрецедентная международная кооперация вокруг проекта ИТЭР, а также амбициозные национальные инициативы по созданию установок T-15МД, TPT и CFETR формируют надежный фундамент для того, чтобы в ближайшие десятилетия человечество получило доступ к безопасному, экологически чистому и практически неисчерпаемому источнику энергии.

Список литературы

1. Ермаков Н.В., Кукушкин К.А., Жильцов Н.С. и др. Формирование области высокой плотности со стороны сильного магнитного поля вблизи внутреннего дивертора токамака Глобус-М2 // Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51, Вып. 6. – С. 24-28. URL: https://www.researchgate.net/publication/390910060_Formirovanie_oblasti_vysokoj_plotnosti_so_storony_silnogo_magnitnogo_pola_vblizi_vnutrennego_divertora_tokamaka_GLOBUS-M2
2. Изарова А.Д., Белов А.М., Елисеев Л.Г. и др. Методы обработки сигналов магнитных зондов токамака Т-15МД // Физика плазмы. – 2025. – Т. 51, № 4. – С. 351-368. URL: <https://journals.rcsi.science/0367-2921/article/view/313084>
3. Ильгисонис В.И., Ильин К.И., Новиков С.Г., Оленин Ю.А. О программе российских исследований в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий // Физика плазмы. – 2021. – Т. 47, № 11. – С. 963-969. URL: <https://sciencejournals.ru/viewarticle/?j=fizplaz&y=2021&v=47&n=11&a=FizPlaz2111017Ilgisonis>
4. Корнев В.А., Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г. и др. Расчеты вращательного момента, прикладываемого к плазме при инжекции высокоэнергичного нейтрального пучка в токамаке ТУМАН-3М // Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51, Вып. 3. – С. 46-49. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/59821>
5. Chang H.J., Wang S.W. Advancements in Tokamak Technology for Fusion Energy: A Bibliometric and Patent Trend Analysis (2014–2024) // Energies. – 2025. – Vol. 18. – P. 4450. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/16/4450>

6. Garcia J., JET Contributors. Importance of the second D-T campaign at JET for future fusion tokamak devices // *Reviews of Modern Plasma Physics*. – 2025. – Vol. 9, № 10. – P. 1-50. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41614-025-00182-x>
7. Hassanein A., Sizyuk V. Potential design problems for ITER fusion device // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11, № 2069. – pp. 1-11. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-81510-2>
8. Katoch G., Sharma G., Alaghbari M. et al. Fusion energy: a sustainable pathway to meeting future global energy demands // *Discover Sustainability*. – 2025. – Vol. 6, № 221. – pp. 1-13. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-025-00906-6>
9. Masoudi A., Iraj D., Rasouli C. Investigation of the effects of transient heat loads on plasma-facing materials in Tokamaks // *Advances in Energy Science and Technology*. – 2025. – Vol. 1, № 2. – pp. 172-185. URL: <https://arxiv.org/abs/2512.00529>
10. Peluso E., Pakhomova E., Gelfusa M. New Challenges in Nuclear Fusion Reactors: From Data Analysis to Materials and Manufacturing // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, № 6240. – pp. 1-9. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/10/6240>
11. Solano E.R. Fusion research in a Deuterium-Tritium tokamak // *CIEMAT*. – Madrid, Spain. – pp. 1-47. URL: <https://arxiv.org/pdf/2504.11222>
12. Zheng J., Qin J., Lu K. et al. Recent progress in Chinese fusion research based on superconducting tokamak configuration // *The Innovation*. – 2022. – Vol. 3, № 4. – pp. 100269. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666675822000650>

References

1. Ermakov N.V., Kukushkin K.A., Zhiltsov N.S., et al. Formation of a high-density region on the side of a strong magnetic field near the internal divertor of the Globus-M2 tokamak // *Letters to the Journal of Technical Physics*. - 2025. - Vol. 51, Issue. - pp. 24-28. URL: https://www.researchgate.net/publication/390910060_Formirovanie_oblasti_vysokoj_plotnost_i_so_storony_silnogo_magnitnogo_pola_vblizi_vnutrennego_divertora_tokamaka_GLOBUS-M2
2. Izarova A.D., Belov A.M., Eliseev L.G., et al. Methods for processing signals from magnetic probes of the T-15MD tokamak // *Plasma Physics*. – 2025. – Vol. 51, No. 4. – pp. 351-368. URL: <https://journals.rcsi.science/0367-2921/article/view/313084>
3. Ilgisonis V.I., Ilyin K.I., Novikov S.G., Olenin Yu.A. On the Russian research program in the field of controlled thermonuclear fusion and plasma technologies // *Plasma Physics*. – 2021. – Vol. 47, No. 11. – pp. 963-969. URL: <https://sciencejournals.ru/viewarticle/?j=fizplaz&y=2021&v=47&n=11&a=FizPlaz2111017Ilgisonis>
4. Kornev V.A., Abdullina G.I., Askinazi L.G. et al. Calculations of the Torque Applied to Plasma during High-Energy Neutral Beam Injection in the TUMAN-3M Tokamak // *Letters to the Journal of Technical Physics*. - 2025. - Vol. 51, Issue. - pp. 46-49. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/59821>
5. Chang H.J., Wang S.W. Advancements in Tokamak Technology for Fusion Energy: A Bibliometric and Patent Trend Analysis (2014–2024) // *Energies*. - 2025. - Vol. 18. - pp. 4450. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/16/4450>

6. Garcia J., JET Contributors. Importance of the second D-T campaign at JET for future fusion tokamak devices // *Reviews of Modern Plasma Physics*. – 2025. – Vol. 9, No. 10. – pp. 1-50. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41614-025-00182-x>
 7. Hassanein A., Sizyuk V. Potential design problems for ITER fusion device // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11, No. 2069. – pp. 1-11. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-81510-2>
 8. Katoch G., Sharma G., Alaghbari M. et al. Fusion energy: a sustainable pathway to meeting future global energy demands // *Discover Sustainability*. – 2025. – Vol. 6, No. 221. – pp. 1-13. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-025-00906-6>
 9. Masoudi A., Iraj D., Rasouli C. Investigation of the effects of transient heat loads on plasma-facing materials in Tokamaks // *Advances in Energy Science and Technology*. – 2025. – Vol. 1, No. 2. – pp. 172-185. URL: <https://arxiv.org/abs/2512.00529>
 10. Peluso E., Pakhomova E., Gelfusa M. New Challenges in Nuclear Fusion Reactors: From Data Analysis to Materials and Manufacturing // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 6240. – pp. 1-9. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/10/6240>
 11. Solano E.R. Fusion research in a Deuterium-Tritium tokamak // CIEMAT. – Madrid, Spain. – pp. 1-47. URL: <https://arxiv.org/pdf/2504.11222>
 12. Zheng J., Qin J., Lu K. et al. Recent progress in Chinese fusion research based on superconducting tokamak configuration // *The Innovation*. – 2022. – Vol. 3, No. 4. – pp. 100269. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666675822000650>
-



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 621.3.018.3:621.311.016.35:621.372.54:621.311.1

ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА СТАБИЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ

Банщикова В.Д., ¹Логинова М.М., Какауров С.В.

ФГБОУ ВО "ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ", Чита, Россия (672039, Забайкальский край, город Чита, Александро-Заводская ул., д.30), e-mail: ¹marykhas@yandex.ru

В статье рассматривается проблема возникновения гармоник в линиях электропередачи. Описываются причины их появления, а также негативное влияние на работу электрических сетей. Приведены методы и технологии для снижения уровня гармоник, что способствует повышению эффективности и надёжности электроснабжения.

Ключевые слова: Гармоники, электросети, качество электроэнергии, искажения напряжения, фильтры, компенсация реактивной мощности.

THE INFLUENCE OF HIGHER HARMONICS ON THE STABILITY OF ELECTRIC GRID AND MODERN FILTRATION METHODS

Banshchikova V.D., ¹Loginova M.M., Kakaurov S.V.

ZABAIKALSKY STATE UNIVERSITY, Chita, Russia (672039 30 Aleksandro-Zavodskaya ul., Zabaikalskii krai, Zabaykalskii krai, goroda Chita), e-mail: ¹marykhas@yandex.ru

This article examines the problem of harmonics in power transmission lines. The causes of their occurrence and the negative impact they have on the operation of electrical networks are described. Methods and technologies for reducing harmonic levels are presented, which contributes to increased efficiency and reliability of power supply.

Keywords: Harmonics, power grids, power quality, voltage distortion, filters, reactive power compensation.

В современных условиях развития технологий и роста потребления электроэнергии проблема качества электроэнергии становится всё более актуальной. Одной из основных проблем являются гармоники. В области электротехники гармоника относится к целому числу, кратному основной частоте. Эти гармонические составляющие представляют собой нежелательные и искаженные формы сигналов, которые имеют частоты выше основной.

Учитывая, что все наши электрические устройства рассчитаны на частоту 50 Гц или 60 Гц в зависимости от региона, высокочастотные сигналы могут привести к снижению эффективности системы, повышению температуры и напряжения на нейтральной линии. Гармоники обычно генерируются нелинейными нагрузками, такими как преобразователи частоты, выпрямители, инверторы и другие устройства, которые искажают форму тока и напряжения.

Высшие гармоники могут вызывать ряд негативных последствий:

1. *Снижение КПД оборудования:* гармоники приводят к дополнительным потерям мощности в электрических сетях, что снижает эффективность работы оборудования.

2. *Перегрев кабелей:* из-за гармонических токов происходит дополнительный нагрев кабелей, что может привести к их повреждению.

3. *Нестабильность напряжения:* гармоники вызывают искажения формы напряжения, что приводит к нестабильности напряжения в сети.

4. Помехи в работе электронных устройств: высшие гармоники создают помехи, которые могут влиять на работу электронных устройств и систем управления.

Поэтому важно понимать природу гармоник и разрабатывать методы для их снижения.

Основными причинами возникновения гармоник являются:

1. Нелинейные нагрузки, такие как выпрямители и инверторы, которые преобразуют переменный ток в постоянный и наоборот.

2. Искажение формы тока и напряжения из-за наличия ёмкостных и индуктивных элементов в электрической сети.

3. Несовершенство системы электроснабжения, включая устаревшее оборудование и неправильную конфигурацию сети.

Методы снижения гармоник

Для снижения влияния гармоник можно использовать следующие методы:

1. *Фильтрация:* фильтры, настроенные на определённые частоты гармоник, позволяют снизить уровень гармонических искажений.

2. *Компенсация реактивной мощности:* установка компенсаторов реактивной мощности помогает улучшить коэффициент мощности и снизить гармонические искажения.

3. *Оптимизация системы электроснабжения:* изменение конфигурации сети, например, путём установки дополнительных трансформаторов или изменения параметров линий электропередачи, может снизить уровень гармоник.

4. *Использование источников бесперебойного питания (ИБП):* современные ИБП имеют встроенные фильтры гармоник, которые помогают снизить их влияние на сеть.

5. *Мониторинг и анализ:* Регулярный мониторинг и анализ качества электроэнергии позволяют выявить проблемы, связанные с высшими гармониками, и принять меры по их устранению.

Заключение

Проблема высших гармоник остаётся актуальной в условиях роста доли нелинейных нагрузок и повышения требований к качеству электроэнергии. Комплексное применение описанных методов позволяет:

- минимизировать искажения напряжения и тока;
- повысить энергоэффективность и надёжность электросетей;
- снизить риски аварий и продлить срок службы оборудования;
- обеспечить стабильное электроснабжение потребителей.

Перспективным направлением дальнейшего развития является совершенствование интеллектуальных систем мониторинга и автоматизированных средств фильтрации гармоник, что позволит оперативно реагировать на изменения параметров сети и поддерживать высокое качество электроэнергии в динамичных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Гармоники тока и напряжения в электротехнике [Электронный ресурс] - URL: <https://profazu.ru/knowledge/electrical/garmonika-v-elektrotehnike.html> - (дата обращения: 19.12.2024)
2. Бунтеев, Ю.Е. Анализ методов определения источников высших гармоник в электрических сетях промышленных предприятий / Бунтеев Ю.Е., Шклярский Я.Э., // Энергетика. Журнал научный публикаций аспирантов и докторантов. – 2016. URL: <https://jurnal.org/articles/2016/elect1.html> - (дата обращения: 19.12.2024)
3. Что такое гармоники в электричестве / ЦентрЭнергоЭкспертизы / Статья // URL: <https://cenerg.ru/articles/chto-takoe-garmoniki-v-electrichestve/> - (дата обращения: 19.12.2024)
4. Бондарев, В.А. Высшие гармоники и их влияние на работу электроустановок / Бондарев В.А., Семёнов А.С. // Материалы VIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» URL: <https://scienceforum.ru/2016/article/2016026632> - (дата обращения: 19.12.2024).
5. Дрей М.Н., Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, «Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения с малой установленной мощностью» URL: https://www.chuvsu.ru/wp-content/uploads/2021/06/drey_nm-disser.pdf (дата обращения 14.04.2026)

References

1. Current and voltage harmonics in electrical engineering [Electronic resource] - URL: <https://profazu.ru/knowledge/electrical/garmonika-v-elektrotehnike.html> - (date of access: 12/19/2024)
 2. Bunteev, Yu.E. Analysis of methods for determining sources of higher harmonics in electrical networks of industrial enterprises / Bunteev Yu.E., Shklyarsky Ya.E., // Power Engineering. Journal of scientific publications of postgraduate and doctoral students. – 2016. URL: <https://jurnal.org/articles/2016/elect1.html> - (date of access: 19.12.2024)
 3. What are harmonics in electricity / CenterEnergoEkspertizy / Article // URL: <https://cenerg.ru/articles/chto-takoe-garmoniki-v-electrichestve/> - (date of access: 19.12.2024)
 4. Bondarev, V.A. Higher harmonics and their influence on the operation of electrical installations / Bondarev V.A., Semenov A.S. // Proceedings of the VIII International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum" URL: <https://scienceforum.ru/2016/article/2016026632> - (date of access: 19.12.2024).
 5. Drey M.N., Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, “Reactive Power Compensation in Power Supply Systems with Low Installed Capacity” URL: https://www.chuvsu.ru/wp-content/uploads/2021/06/drey_nm-disser.pdf (date accessed 04/14/2026)
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 614.841.2.001.2

ДИАГНОСТИКА АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ МЕДНЫХ ЖИЛ

Мокряк А.В.

ФГБОУ ВО "САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ ИМЕНИ ГЕРОЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ГЕНЕРАЛА АРМИИ Е.Н.ЗИНИЧЕВА", Санкт-Петербург, Россия (196105, г.Санкт-Петербург, Московский проспект, д.149), e-mail: mokryakanna@mail.ru

В статье представлены результаты экспериментального исследования изменения микротвердости медных проводников судового кабеля СПОВ 3×1 после воздействия сверхтоков различной кратности (от 40 до 480 А). Методом микроиндентирования на приборе PMT-3M измерена твердость по Виккерсу для каждого режима. Установлено снижение микротвердости с 80,7 HV (контроль) до 47,8 HV (480 А). Выявлен немонотонный характер изменения твердости (при 240 А зафиксирован рост до 64,2 HV), объясняемый конкуренцией процессов рекристаллизации и деформационного упрочнения. Обоснована целесообразность использования метода измерения микротвердости в качестве дополнительного диагностического критерия при производстве пожарно-технических экспертиз, особенно в случаях слабо выраженных внешних повреждений.

Ключевые слова: Микротвердость, медные проводники, сверхток, рекристаллизация, деформационное упрочнение, PMT-3M, пожарно-техническая экспертиза.

DIAGNOSTICS OF ELECTRIC WIRING ACCIDENTS BASED ON THE MEASUREMENT OF THE MICROHARDNESS OF COPPER VESSELS

Mokryak A.V.

ST. PETERSBURG UNIVERSITY OF THE STATE FIRE SERVICE OF THE MINISTRY OF THE RUSSIAN FEDERATION FOR CIVIL DEFENSE, EMERGENCIES AND ELIMINATION OF CONSEQUENCES OF NATURAL DISASTERS NAMED AFTER THE HERO OF THE RUSSIAN FEDERATION, GENERAL OF THE ARMY E.N. ZINICHEV, St. Petersburg, Russia (196105, St. Petersburg, Moskovsky prospekt, 149), e-mail: mokryakanna@mail.ru

The article presents the results of an experimental study of the change in microhardness of the copper conductors of the SPOV 3×1 ship cable after exposure to overcurrents of various multiples (from 40 to 480 A). The Vickers hardness was measured for each mode using the PMT-3M microindentation device. The microhardness was found to decrease from 80.7 HV (control) to 47.8 HV (480 A). A non-monotonic change in hardness was detected (an increase to 64.2 HV was recorded at 240 A), which can be explained by the competition between recrystallization and strain hardening. The use of microhardness measurement as an additional diagnostic criterion in fire and technical examinations is justified, especially in cases of mild external damage.

Keywords: Microhardness, copper conductors, overcurrent, recrystallization, strain hardening, PMT-3M, fire and technical examinations.

Введение

При производстве судебных пожарно-технических экспертиз одной из наиболее сложных задач является определение природы теплового воздействия на токопроводящие жилы: было ли оно первичным (аварийный режим) или вторичным (воздействие пожара на обесточенную проводку). Существующие методики, основанные на визуальном и металлографическом анализе, не всегда позволяют получить количественные критерии для достоверной дифференциации [1-4, 8].

Метод измерения микротвердости позволяет фиксировать изменения механических свойств материала на микроуровне, что делает его перспективным инструментом для диагностики термических повреждений. Цель настоящей работы — исследование зависимости микротвердости медных проводников от величины протекавшего сверхтока и оценка возможности применения метода микроиндентирования в экспертной практике [5-7, 9, 10].

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выбран медный проводник — судовой кабель СПОВ 3×1 с медными жилами сечением 1 мм². Образцы подвергались воздействию электрического тока в диапазоне от 40 до 480 А. Длительность воздействия представлена в Таблице 1.

Таблица 1 – Режимы теплового воздействия на образцы

Образец	Сила тока, А	Время воздействия
№0 (контроль)	0	–
№1	40	26 мин
№2	120	25 мин
№3	180	4 мин
№4	240	2 мин 42 с
№5	300	1 мин 20 с
№6	390	7 с
№7	480	5 с

Измерение микротвердости выполнялось на микротвердомере ПМТ-3М (Рисунок 1) в соответствии с методикой поверки МИ 224-82. Нагрузка на индентор Виккерса составляла 10 г, время выдержки под нагрузкой — 15 с. Для каждого образца производилось не менее 10 измерений.



Рисунок 1 – Микротвердомер ПМТ-3М

Результаты измерения микротвердости для каждого образца представлены в Таблице 2 и на Рисунке 2.

Таблица 2 – Результаты измерения микротвердости медных жил

Образец	Сила тока, А	Средняя твердость HV	Стандартное отклонение
№0	0	80,7	7,1
№1	40	73,1	4,0
№2	120	60,4	3,1
№3	180	52,4	5,6
№4	240	64,2	2,0
№5	300	56,8	3,6
№6	390	48,2	4,0
№7	480	47,8	3,6

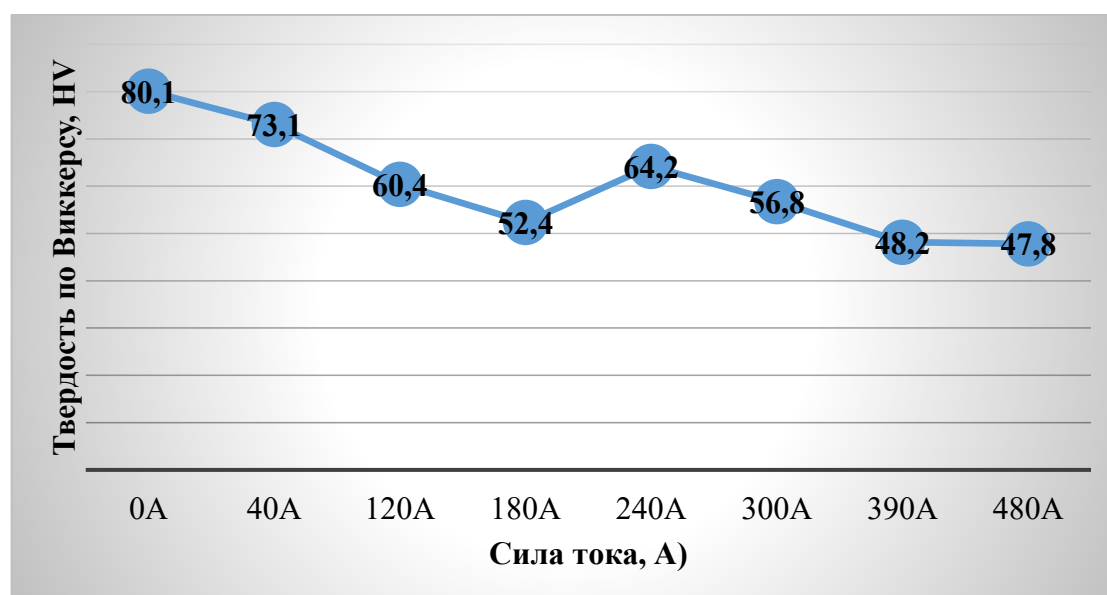


Рисунок 2– Зависимость микротвердости медного проводника от силы тока

Анализ результатов позволяет выделить три характерных режима изменения микротвердости:

- режим рекристаллизации (40–180 А): Твердость снижается с 80,7 HV до 52,4 HV. При нагреве выше температуры рекристаллизации меди ($\approx 200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$) происходит формирование новых равноосных зерен, что сопровождается снижением прочностных характеристик;
- аномальное повышение (240 А): Зафиксирован рост твердости до 64,2 HV. Данный эффект объясняется конкуренцией процессов рекристаллизации и деформационного упрочнения, возникающего при кратковременном действии высоких термических напряжений;
- глубокие структурные изменения (300–480 А): Твердость последовательно снижается до минимальных значений 47,8 HV. При сверхкратковременном воздействии (5–7 секунд) нагрев происходит практически адиабатически, вызывая необратимые изменения в структуре металла.

Сравнение результатов визуального осмотра и измерения микротвердости выявило ключевое преимущество последнего метода. При протекании тока 480 А оболочка и изоляция имели лишь незначительные повреждения, тогда как микротвердость медных жил снизилась с 80,7 HV до 47,8 HV (снижение на 41%). Это доказывает, что метод позволяет выявлять термические повреждения даже при отсутствии выраженных внешних признаков.

Медь, как металл с гранецентрированной кубической решеткой, характеризуется высокой скоростью процессов возврата и рекристаллизации. При длительном нагреве (образцы №1–№3) процессы рекристаллизации протекают в полном объеме, что приводит к последовательному снижению твердости.

Аномальное повышение твердости при 240 А может быть связано с кратковременным нагревом до высоких температур, при которых не успевают завершиться процессы рекристаллизации, но происходит локальное деформационное упрочнение за счет термических напряжений. Дополнительным фактором может быть взаимодействие меди с атмосферным кислородом с образованием тонких оксидных пленок.

Заключение

В ходе экспериментального исследования установлено, что увеличение силы тока от 40 до 480 А приводит к снижению микротвердости медных жил с 80,7 HV до 47,8 HV. При этом выявлен немонотонный характер изменения твердости, обусловленный конкуренцией процессов рекристаллизации и деформационного упрочнения. Полученные данные позволяют заключить, что метод измерения микротвердости на приборе ПМТ-3М является высокочувствительным и информативным инструментом для диагностики аварийных режимов работы электропроводки, особенно в случаях, когда внешние признаки термического воздействия выражены слабо. В связи с этим рекомендуется применять метод микроиндентирования в комплексе с визуальным и металлографическим анализом при производстве судебных пожарно-технических экспертиз.

Список литературы

1. Чешко И.Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). – СПб.: Санкт-Петербургский институт пожарной безопасности МВД России, 1997. – 560 с.

2. Мокряк А.Ю., Мокряк А.В. Исследование металлических и электротехнических объектов судебной пожарно-технической экспертизы: монография / под общ. ред. Б.В. Гавкалюка. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. – 212 с.
3. Burkov A.F., Mikhanoshin V.V., Van Ha N. Investigation of the qualitative characteristics of marine cable products // Russian Electrical Engineering. 2024. Т. 95, № 7. pp. 569–573. DOI: 10.3103/S106837122470078X EDN: RWYBYI
4. Смелков Г.И., Чешко И.Д., Плотников В.Г. Экспериментальное моделирование пожароопасных аварийных режимов в электрических проводах // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2017. № 3. С. 121–128. EDN: ZOTVJV
5. Мокряк А.Ю., Чешко И.Д., Пеньков В.В. Морфологический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, при экспертизе пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 4 (32). С. 41–49
6. Колмаков А.И., Зернов С.И., Степанов Б.В., и др. Диагностические критерии термических повреждений металлических проводников на пожарах // Судебная экспертиза. 2019. № 2. С. 56–63.
7. Петров В.В., Сидоров А.Н., Кузнецов Д.Ю. Микроструктурные изменения меди при кратковременном высокотемпературном нагреве // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 5. С. 512–519. DOI: 10.1134/S0031918X2005012X
8. Иванов С.А., Смирнова Е.П., Козлов В.А. Применение методов индентирования при исследовании материалов электротехнического назначения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88, № 3. С. 44–50. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-3-44-50 EDN: BBVCCC
9. Михайлов А.Г., Федоров Б.Н. Рекристаллизация и механические свойства медных проводников при термическом воздействии // Металловедение и термическая обработка металлов. 2021. № 8 (794). С. 32–38. EDN: DDDEEE
10. Лебедев В.К., Соколов И.И. Твёрдость как критерий оценки степени термического повреждения медных сплавов // Деформация и разрушение материалов. 2023. № 6. С. 15–21. DOI: 10.31044/1814-4632-2023-6-15-21

References

1. Cheshko I.D. Fire Examination (Objects, Methods, Research Techniques). – St. Petersburg: St. Petersburg Institute of Fire Safety of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 1997. – p.560
2. Mokryak A.Yu., Mokryak A.V. Study of Metallic and Electrical Objects of Forensic Fire-Technical Examination: Monograph / edited by B.V. Gavkalyuk. – St. Petersburg: St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022. – p.212
3. Burkov A.F., Mikhanoshin V.V., Van Ha N. Investigation of the Qualitative Characteristics of Marine Cable Products // Russian Electrical Engineering. 2024. Vol. 95, No. 7. pp. 569–573. DOI: 10.3103/S106837122470078X EDN: RWYBYI
4. Smelkov G.I., Cheshko I.D., Plotnikov V.G. Experimental modeling of fire-hazardous emergency modes in electrical wires // Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2017. No. 3. pp. 121–128. EDN: ZOTVJV

5. Mokryak A.Yu., Cheshko I.D., Penkov V.V. Morphological analysis of copper conductors exposed to current overload during fire examination // Problems of Risk Management in the Technosphere. 2014. No. 4 (32). pp. 41–49
 6. Kolmakov A.I., Zernov S.I., Stepanov B.V., et al. Diagnostic criteria for thermal damage to metal conductors in fires // Forensic examination. 2019. No. 2. pp. 56–63.
 7. Petrov V.V., Sidorov A.N., Kuznetsov D.Yu. Microstructural changes in copper during short-term high-temperature heating // Physics of Metals and Metal Science. 2020. Vol. 121, No. 5. pp. 512–519. DOI: 10.1134/S0031918X2005012X
 8. Ivanov S.A., Smirnova E.P., Kozlov V.A. Application of indentation methods in the study of electrical materials // Factory laboratory. Diagnostics of materials. 2022. Vol. 88, No. 3. Pp. 44–50. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-3-44-50 EDN: BBBCCC
 9. Mikhailov A.G., Fedorov B.N. Recrystallization and mechanical properties of copper conductors under thermal influence // Metallurgy and heat treatment of metals. 2021. No. 8 (794). pp. 32–38. EDN: DDDEEE
 10. Lebedev V.K., Sokolov I.I. Hardness as a criterion for assessing the degree of thermal damage to copper alloys // Deformation and failure of materials. 2023. No. 6. pp. 15–21. DOI: 10.31044/1814-4632-2023-6-15-21
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 614.841.2.001.2

МОРФОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СУДОВОГО КАБЕЛЯ СПОВ 3×1 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕРХТОКОВ РАЗЛИЧНОЙ КРАТНОСТИ

Мокряк А.В.

ФГБОУ ВО "САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ ИМЕНИ ГЕРОЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ГЕНЕРАЛА АРМИИ Е.Н.ЗИНИЧЕВА", Санкт-Петербург, Россия (196105, г.Санкт-Петербург, Московский проспект, д.149), e-mail: mokryakanna@mail.ru

В статье представлены результаты экспериментального исследования морфологических изменений конструкции судового кабеля СПОВ 3×1 при пропускании электрического тока в диапазоне от 40 до 480 А. Описаны характер и степень повреждений оболочки, изоляции и медных жил в зависимости от величины тока и длительности воздействия. Установлено, что с ростом силы тока наблюдается закономерная эволюция термических повреждений: от локального обугливания при 40–120 А до полного разрушения изоляции при 300–480 А. Выявлены особенности морфологии повреждений при кратковременных сверхтоках (390–480 А), когда медные жилы сохраняют металлический блеск при отсутствии изоляции. Показана значимость визуального анализа для диагностики аварийных режимов при производстве пожарно-технических экспертиз.

Ключевые слова: Судовой кабель СПОВ, морфология повреждений, термическое воздействие, сверхток, изоляция кабеля, пожарно-техническая экспертиза, визуальный осмотр.

MORPHOLOGY OF THERMAL DAMAGES OF THE SPOV 3×1 SHIP CABEL UNDER THE INFLUENCE OF OVERCURRENTS OF VARIOUS MULTIPLICITY

Mokryak A.V.

ST. PETERSBURG UNIVERSITY OF THE STATE FIRE SERVICE OF THE MINISTRY OF THE RUSSIAN FEDERATION FOR CIVIL DEFENSE, EMERGENCIES AND ELIMINATION OF CONSEQUENCES OF NATURAL DISASTERS NAMED AFTER THE HERO OF THE RUSSIAN FEDERATION, GENERAL OF THE ARMY E.N. ZINICHEV, St. Petersburg, Russia (196105, St. Petersburg, Moskovsky prospekt, 149), e-mail: mokryakanna@mail.ru

The article presents the results of an experimental study of the morphological changes in the design of the SPOV 3×1 marine cable when an electric current is passed through it in the range of 40 to 480 A. The nature and extent of damage to the sheath, insulation, and copper wires are described, depending on the current strength and duration of exposure. It was found that as the current strength increases, there is a consistent evolution of thermal damage, from local charring at 40–120 A to complete insulation failure at 300–480 A. The article reveals the features of damage morphology during short-term overcurrents (390–480 A), when the copper conductors retain their metallic sheen in the absence of insulation. The article demonstrates the importance of visual analysis for diagnosing emergency conditions during fire and technical examinations.

Keywords: Ship cable SPOV, damage morphology, thermal impact, overcurrent, cable insulation, fire and technical examination, visual inspection.

Введение

Пожары, возникающие вследствие аварийных режимов работы кабельных линий, составляют значительную долю от общего числа техногенных пожаров. Визуальный анализ поврежденных проводников является первым и обязательным этапом любой пожарно-технической экспертизы. Именно характер внешних повреждений позволяет эксперту сделать предварительные выводы о природе теплового воздействия — было ли оно первичным (связанным с протеканием сверхтока) или вторичным (результатом воздействия внешнего пожара) [1-4, 8].

Кабель СПОВ 3×1, применяемый на судах морского и речного флотов, имеет типичную для многих кабельных изделий конструкцию: три медные жилы сечением 1 мм², изоляцию из облученного полиэтилена и оболочку из теплостойкого поливинилхлоридного пластиката. Изучение морфологии его повреждений при различных режимах сверхтока позволяет выявить общие закономерности, применимые к широкому классу кабельной продукции [5-7, 9, 10].

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выбран судовой кабель марки К46 СПОВ 3×1 (Рисунок 1). Длительно допустимый ток кабеля составляет 16,7 А. Нагрев образцов осуществлялся путем пропускания электрического тока различной кратности в диапазоне от 40 до 480 А. Длительность воздействия варьировалась от 26 минут (при 40 А) до 5 секунд (при 480 А) и определялась временем достижения критического состояния проводника.

После воздействия сверхтока проводился визуальный осмотр образцов с фиксацией состояния оболочки, изоляции каждой жилы и самих медных проводников. Для документирования результатов выполнялась фотосъемка.

Результаты исследования морфологии повреждений

Визуальный осмотр образцов (Таблица 1, Рисунки 1-8) показал, что с увеличением силы тока происходит закономерное нарастание термических повреждений всех элементов кабельной конструкции.



Рисунок 1 – Морфология повреждения кабеля СПОВ 3×1 после воздействия тока 40 А



Рисунок 2 – Морфология повреждения кабеля СПОВ 3×1 после воздействия тока 120 А



Рисунок 3 –Морфология повреждения кабеля СПОВ 3×1 после воздействия тока 180А



Рисунок 4 –Морфология повреждения кабеля СПОВ 3×1 после воздействия тока 240 А



Рисунок 5 –Морфология повреждения кабеля СПОВ 3×1 после воздействия тока 300 А



Рисунок 6 –Морфология повреждения кабеля СПОВ 3×1 после воздействия тока 390 А



Рисунок 7 –Морфология повреждения кабеля СПОВ 3×1 после воздействия тока 480 А

Таблица 1 – Результаты визуального осмотра образцов кабеля СПОВ 3×1

Образец	Сила тока, А	Состояние оболочки	Состояние изоляции жил	Состояние медных жил
№0 (контроль)	0	Без изменений	Без изменений, цветовая идентификация четкая	Металлический блеск
№1	40	Без изменений	Без изменений	Без повреждений
№2	120	Обугливание	Следы оплавления, нарушена цветовая идентификация	Без видимых повреждений
№3	180	Механическая деформация, обугливание	Отсутствует на отдельных участках	Наплавление остатков изоляции
№4	240	Спиральное термическое повреждение	Отсутствует	Частично без оплавлений
№5	300	Оплавление по краям	Частично сохранилась, пигменты обесцвечены	Незначительное наплавление
№6	390	Закопчение по краям	Избирательное повреждение (жила красного цвета)	Металлический блеск сохранен
№7	480	Незначительное оплавление по краям	Локальное повреждение	Без видимых повреждений

Режим 1: Токи 40–120 А (длительное воздействие)

При токах 40–120 А изоляция и оболочка кабеля сохраняют структурную целостность. Наблюдаются лишь локальное обугливание поверхности оболочки (при 120 А) и начальные следы оплавления изоляции (рисунки 1, 2). Цветовая идентификация жил частично нарушается. Медные жилы внешне остаются неповрежденными, сохраняя металлический блеск.

Режим 2: Токи 180–240 А (средняя длительность)

При токах 180–240 А происходят значительные изменения. Оболочка подвергается механической деформации и обугливанию. Изоляция жил полностью отсутствует на отдельных участках (рисунок 3). На поверхности медных жил появляются наплавления остатков изоляции. При 240 А наблюдается специфическое спиральное термическое повреждение оболочки.

Режим 3: Токи 300–480 А (кратковременное воздействие)

Наиболее интересная картина наблюдается при сверхкратковременном воздействии токов большой силы (390–480 А, длительность 5–7 секунд). Изоляция практически полностью разрушается, медные жилы оголяются. Однако, в отличие от режимов 180–240 А, на

поверхности медных жил могут отсутствовать следы оплавления и наплавлений. Жилы сохраняют металлический блеск (рисунки 6–8), что визуально может быть ошибочно интерпретировано как отсутствие термического воздействия.

Обсуждение

Выявленная закономерность имеет важное практическое значение для пожарно-технической экспертизы. Традиционно наличие оголенных, но блестящих медных жил может рассматриваться как признак вторичного воздействия пожара на обесточенный кабель. Однако результаты эксперимента показывают, что такая морфология характерна и для первичного аварийного режима — кратковременного протекания сверхтока большой силы (390–480 А).

При таких токах нагрев происходит практически адиабатически, температура может достигать высоких значений, но из-за малого времени воздействия (5–7 секунд) изоляция успевает разрушиться, а поверхность меди не окисляется и не оплавляется.

Заключение

В ходе экспериментального исследования установлено, что с ростом силы тока от 40 до 480 А происходит закономерная эволюция морфологических повреждений кабеля СПОВ 3×1: от локального обугливания до полного разрушения изоляции и оболочки. При этом выявлен немонотонный характер изменения состояния медных жил: при 180–240 А наблюдаются наплавления изоляции, тогда как при 390–480 А жилы остаются визуально чистыми с металлическим блеском. Полученные данные показывают, что визуальный осмотр не всегда позволяет однозначно дифференцировать первичный аварийный нагрев от вторичного воздействия пожара, что требует применения дополнительных методов анализа.

Список литературы

1. Чешко И.Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). – СПб.: Санкт-Петербургский институт пожарной безопасности МВД России, 1997. – 560 с.
2. Мокряк А.Ю., Мокряк А.В. Исследование металлических и электротехнических объектов судебной пожарно-технической экспертизы: монография / под общ. ред. Б.В. Гавкалюка. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. – 212 с.
3. Burkov A.F., Mikhanoshin V.V., Van Ha N. Investigation of the qualitative characteristics of marine cable products // Russian Electrical Engineering. 2024. Т. 95, № 7. pp. 569–573. DOI: 10.3103/S106837122470078X EDN: RWYBYI
4. Смелков Г.И., Чешко И.Д., Плотников В.Г. Экспериментальное моделирование пожароопасных аварийных режимов в электрических проводах // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2017. № 3. С. 121–128. EDN: ZOTVJV
5. Мокряк А.Ю., Чешко И.Д., Пеньков В.В. Морфологический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, при экспертизе пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 4 (32). С. 41–49
6. Колмаков А.И., Зернов С.И., Степанов Б.В., и др. Диагностические критерии термических повреждений металлических проводников на пожарах // Судебная экспертиза. 2019. № 2. С. 56–63.

7. Петров В.В., Сидоров А.Н., Кузнецов Д.Ю. Микроструктурные изменения меди при кратковременном высокотемпературном нагреве // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 5. С. 512–519. DOI: 10.1134/S0031918X2005012X
8. Иванов С.А., Смирнова Е.П., Козлов В.А. Применение методов индентирования при исследовании материалов электротехнического назначения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88, № 3. С. 44–50. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-3-44-50 EDN: BBCCS
9. Михайлов А.Г., Федоров Б.Н. Рекристаллизация и механические свойства медных проводников при термическом воздействии // Металловедение и термическая обработка металлов. 2021. № 8 (794). С. 32–38. EDN: DDDEEE
10. Лебедев В.К., Соколов И.И. Твёрдость как критерий оценки степени термического повреждения медных сплавов // Деформация и разрушение материалов. 2023. № 6. С. 15–21. DOI: 10.31044/1814-4632-2023-6-15-21

References

1. Cheshko I.D. Fire Examination (Objects, Methods, Research Techniques). – St. Petersburg: St. Petersburg Institute of Fire Safety of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 1997. – p.560
2. Mokryak A.Yu., Mokryak A.V. Study of Metallic and Electrical Objects of Forensic Fire-Technical Examination: Monograph / edited by B.V. Gavkalyuk. – St. Petersburg: St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022. – p.212
3. Burkov A.F., Mikhanoshin V.V., Van Ha N. Investigation of the Qualitative Characteristics of Marine Cable Products // Russian Electrical Engineering. 2024. Vol. 95, No. 7. pp. 569–573. DOI: 10.3103/S106837122470078X EDN: RWYBYI
4. Smelkov G.I., Cheshko I.D., Plotnikov V.G. Experimental modeling of fire-hazardous emergency modes in electrical wires // Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2017. No. 3. pp. 121–128. EDN: ZOTVJV
5. Mokryak A.Yu., Cheshko I.D., Penkov V.V. Morphological analysis of copper conductors exposed to current overload during fire examination // Problems of Risk Management in the Technosphere. 2014. No. 4 (32). pp. 41–49
6. Kolmakov A.I., Zernov S.I., Stepanov B.V., et al. Diagnostic criteria for thermal damage to metal conductors in fires // Forensic examination. 2019. No. 2. pp. 56–63.
7. Petrov V.V., Sidorov A.N., Kuznetsov D.Yu. Microstructural changes in copper during short-term high-temperature heating // Physics of Metals and Metal Science. 2020. Vol. 121, No. 5. pp. 512–519. DOI: 10.1134/S0031918X2005012X
8. Ivanov S.A., Smirnova E.P., Kozlov V.A. Application of indentation methods in the study of electrical materials // Factory laboratory. Diagnostics of materials. 2022. Vol. 88, No. 3. Pp. 44–50. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-3-44-50 EDN: BBCCS
9. Mikhailov A.G., Fedorov B.N. Recrystallization and mechanical properties of copper conductors under thermal influence // Metallurgy and heat treatment of metals. 2021. No. 8 (794). pp. 32–38. EDN: DDDEEE

10. Lebedev V.K., Sokolov I.I. Hardness as a criterion for assessing the degree of thermal damage to copper alloys // Deformation and failure of materials. 2023. No. 6. pp. 15–21. DOI: 10.31044/1814-4632-2023-6-15-21
-



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 624.137.5

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ АНКЕРОВ ПОДПОРНЫХ СТЕНОК В СТЕСНЁННЫХ ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Назаров Н.В.

ФГБОУ ВО «КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И.Т. ТРУБИЛИНА», Краснодар, Россия (350044, Краснодарский край, город Краснодар, ул. им. Калинина, д.13), e-mail: kolyanazarov577077@gmail.com

В статье анализируются современные подходы к выбору анкерных систем для обеспечения устойчивости подпорных стен и ограждений котлованов в условиях плотной городской застройки. Показано, что ограниченность пространства, наличие существующих фундаментов и подземных коммуникаций исключают применение массивных гравитационных конструкций. Рассмотрен переход от классических инъекционных и винтовых технологий к комбинированным решениям, обеспечивающим минимальные деформации основания. Особое внимание уделено критериям выбора между стальными, композитными и инъекционно-винтовыми системами на основе геотехнического прогноза.

Ключевые слова: Подпорная стена, грунтовый анкер, стеснённые условия, городская застройка, геотехнический мониторинг, буроинъекционная технология, винтовой анкер.

THE USE OF VARIOUS TYPES OF RETAINING WALL ANCHORS IN CRAMPED URBAN ENVIRONMENTS

Nazarov N.V.

"KUBAN STATE AGRARIAN UNIVERSITY". I.T. TRUBILINA", Krasnodar, Russia (350044, Krasnodar City, Kalinina Street, 13), e-mail: kolyanazarov577077@gmail.com

The article analyzes modern approaches to the choice of anchor systems to ensure the stability of retaining walls and excavation fences in conditions of dense urban development. It is shown that the limited space, the presence of existing foundations and underground utilities exclude the use of massive gravity structures. The transition from classical injection and screw technologies to combined solutions providing minimal deformations of the base is considered. Special attention is paid to the selection criteria between steel, composite and injection-screw systems based on geotechnical forecasting.

Keywords: Retaining wall, ground anchor, cramped conditions, urban development, geotechnical monitoring, drilling technology, screw anchor.

Активное освоение подземного пространства мегаполисов требует пересмотра традиционных методов крепления бортов котлованов и естественных склонов. В ситуации, когда строительство ведется вплотную к существующим зданиям, исторической застройке или транспортным магистралям, классические распорные системы и массивные контрфорсы становятся технически нереализуемыми из-за дефицита свободной площади [2]. Возникает задача передачи сдвиговых и опрокидывающих нагрузок от ограждающей конструкции вглубь нетронутого грунтового массива, лежащего за пределами призмы обрушения. Единственным эффективным инструментом в данном случае выступают анкерные крепления, однако их номенклатура не ограничивается простейшими тягами.

Цель статьи — систематизация конструктивных особенностей анкеров различного типа, применяемых для удержания подпорных стен, и обоснование критериев их выбора в условиях, типичных для ядра крупного города. В работе синтезированы данные патентных исследований, нормативных рекомендаций и практики геотехнического строительства [6, 9].

Основная часть

1. Специфика городских ограничений

Фундаментальное отличие стеснённых условий от свободной площадки заключается в невозможности размещения техники большого радиуса действия и недопустимости динамических воздействий на грунтовый массив. Забивка или вибропогружение исключаются, уступая место методам вдавливания или бурения. Ключевым фактором становится обход существующих коммуникаций и фундаментов, что требует детальных инженерных изысканий с учащенной сеткой скважин [2].

Кроме того, нормативная база (например, ВСН для исторических центров) прямо предписывает использование анкерных систем как предпочтительного способа раскрепления, при этом корень анкера должен заводиться строго за границу призмы возможного опрокидывания [9]. Эти ограничения формируют запрос на селективный, а не шаблонный подход к проектированию.

2. Классификация и особенности анкерных систем

По способу фиксации в грунте и конструктивному исполнению целесообразно выделить три основные группы, адаптированные под городские условия.

2.1. Буроинъекционные анкеры

Это наиболее распространенный тип постоянных и временных креплений. Технология заключается в проходке скважины с последующим нагнетанием цементного раствора под высоким давлением. Ключевая особенность — формирование корня анкера с развитой поверхностью, работающего за счет сил трения. В условиях города преимуществом выступает возможность выполнения работ малогабаритными станками. Однако существует риск потери раствора в трещиноватых или слабых грунтах, а также сложность перебуривания подземных препятствий. Несущая способность таких анкеров высока (до 450 кН/м и выше при использовании стальных тяг классов А500С и А600) [1, 5].

2.2. Анкеры лобового сопротивления (винтовые и самораскрывающиеся)

При невозможности качественной цементации скважины (например, в водонасыщенных или заторфованных отложениях) эффективны решения, создающие жесткий упор. Винтовые анкеры, погружаемые гидровращателем в заранее пробуренные лидерные скважины, обеспечивают восприятие нагрузки за счет лопастей. Самораскрывающиеся системы с раскладными пластинами создают упор в более прочные слои грунта. Их преимущество — работа без использования жидких растворов, что критически важно при угрозе загрязнения водоносных горизонтов в центре города [5].

2.3. Инъекционно-винтовые (комбинированные) анкеры

В последнее десятилетие активно развиваются гибридные конструкции, совмещающие этап ввинчивания и инъекции [6]. Уникальность данного решения состоит в том, что на участке тела анкера в пределах призмы обрушения (зоны сдвига) навивка шнека отсутствует, а присутствует гладкая труба с перфорированными отверстиями. При нагнетании раствора за

пределами призмы давления формируется локальный «геокомпозитный массив», который работает как анкерная плита, не увеличивая трение в активной зоне сдвига [6]. Такой подход позволяет избежать дополнительного нагружения самой подпорной стены в процессе удержания.

3. Материаловедческий аспект: сталь, композит или геосинтетика?

Выбор материала тяги анкера влияет на долговечность всей системы. В городских условиях действует ряд агрессивных факторов: блуждающие токи, химические реагенты против гололеда, утечки из канализационных сетей.

Стальные анкеры (в том числе с защитным цинковым покрытием) обладают максимальной жесткостью и прочностью, подходят для восприятия вибраций от транспорта. Однако срок их службы ограничен электрохимической коррозией (около 25–40 лет без дополнительной защиты) [1].

Композитные (стекло- и базальтопластиковые) анкеры в 4 раза легче стали, абсолютно не подвержены коррозии, что делает их идеальными для постоянных сооружений. Ограничением является высокая стоимость и риск хрупкого разрушения при знакопеременных нагрузках.

Геосинтетические ленты применяются реже в вертикальных подпорных стенах, но могут служить для армирования обратной засыпки в комплексе с анкерными плитами. Приоритет стали и композита в стесненных условиях связан с необходимостью обеспечения минимальных деформаций (раскрытия трещин) на фасадах примыкающих зданий [2].

4. Нюансы расчета и геотехнического мониторинга

Проектирование анкерного поля в стеснённых условиях невозможно без численного моделирования (МКЭ) и непрерывного мониторинга. Важно контролировать не только общую устойчивость стены (коэффициент запаса по Eurocode 7 должен быть не менее 2.0 [1]), но и локальные осадки соседних фундаментов.

Критичным является усилие натяжения анкера. Избыточное усилие способно вызвать «выпор» грунта в сторону подвала существующего здания или повреждение его фундамента. Поэтому при пересечении траектории анкера с охранной зоной инженерных сетей применяются специальные диэлектрические разъединители или переход на извлекаемые тяги, которые демонтируются после строительства каркаса подземной части [5].

Особое внимание уделяется контролю реологических свойств: ползучесть полимерных смол или релаксация напряжений в стали может привести к постепенному раскрытию деформационных швов. Для исключения кренов рекомендуется поэтапное натяжение с синхронным нивелированием реперов на ближайших строениях [2].

Таким образом, в стеснённых городских условиях анкерные системы являются безальтернативным средством обеспечения устойчивости подпорных стенок и ограждений, позволяя освободить внутреннее пространство котлована. Выбор типа анкера должен основываться на детальном инженерно-геологическом изыскании с точной трассировкой подземных коммуникаций. Для слабых и водонасыщенных грунтов предпочтительны комбинированные инъекционно-винтовые системы, формирующие геокомпозит за пределами призмы опрокидывания; для прочных грунтов — классические высоконагружаемые буроинъекционные. Применение композитных материалов в качестве несущих тяг

перспективно для обеспечения долговечности конструкций в агрессивных средах, однако требует доработки нормативной базы по расчету на динамические воздействия. Главным критерием безопасности выступает непрерывный геотехнический мониторинг, контролирующий взаимодействие анкера с окружающим массивом, что позволяет исключить аварийные деформации соседней застройки.

Список литературы

1. Караваев И.Б. Обзор систем крепления ограждающих конструкций котлованов // Инженерная геотехника: теория и практика. — М.: Мераком, 2025. — 24 с.
2. Сметанкин Р.А. Особенности применения грунтовых анкерных систем при устройстве ограждения котлована в условиях плотной городской застройки // Строительство и архитектура: электронный научный журнал. — 2025.
3. Аванесов В.С. Взаимодействие анкеров с окружающим грунтом и ограждающей конструкцией с учетом их линейных, нелинейных и реологических свойств: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. — М.: МГСУ, 2015. — 112 с.
4. Патент на полезную модель № 150480 U1 Российская Федерация, МПК E02D 5/00. Анкер инъекционно-винтовой для удержания подпорных стенок; опубл. 10.02.2015.
5. Методы усиления подпорных стен: анкеровка и инъекционные технологии // ЮБКа-Строй: технический блог. — 2025.
6. ВСН 2-89. Реконструкция и застройка исторически сложившихся районов Санкт-Петербурга // ДНАОП: Нормативные документы. — Разд. 7-11.
7. Балабенко, Е. В. Оценка и предпосылки развития организационно-институционального механизма государственно-частного партнёрства в жилищном строительстве Донецкой Народной Республики / Е. В. Балабенко // Менеджер. — 2021. — № 1(95). — С. 4-15. — DOI 10.5281/zenodo.4786837. — EDN MKSFGL.
8. Градостроительные аспекты выбора земельного участка для формирования объектов размещения твердых коммунальных отходов / Е. В. Балабенко, Л. Н. Богак, Е. Н. Оберемок, М. А. Черныш // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2023. — Т. 13, № 4(47). — С. 347-358. — DOI 10.21285/2227-2917-2025-2-347-358. — EDN CGXVOI.
9. Балабенко, Е. В. Администрирование организационно-институциональной среды развития государственно-частного партнерства в строительном комплексе / Е. В. Балабенко // Beneficium. — 2024. — № 4(53). — С. 6-14. — DOI 10.34680/BENEFICIUM.2024.4(53).6-14. — EDN BBZSZC.
10. Организационное обеспечение эффективности проектных решений в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве / Е. В. Балабенко, М. Ф. Иванов, Н. А. Пушкарева [и др.]. — Макеевка : Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 2025. — 231 с. — EDN QYIYSL.

References

1. Karavaev I.B. “Overview of Anchoring Systems for Excavation Pit Enclosing Structures.” Moscow: Merakom, 2025, p.24
2. Smetankin R.A. “Peculiarities of Using Soil Anchor Systems in Excavation Pit Enclosures in Dense Urban Environments.” Construction and Architecture: Electronic Scientific Journal. 2025.
3. Avanesov V.S. “Interaction of Anchors with Surrounding Soil and the Enclosing Structure Taking into Account Their Linear, Nonlinear, and Rheological Properties.” Cand. Sci. (Eng.) Dissertation: 05.23.02. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, 2015, p.112

4. Utility Model Patent No. 150480 U1, Russian Federation, IPC E02D 5/00. Injection-screw anchor for retaining retaining walls; published 10.02.2015.
 5. Methods of strengthening retaining walls: anchoring and injection technologies // YUBKa-Stroy: technical blog. - 2025.
 6. VSN 2-89. Reconstruction and development of historically developed districts of St. Petersburg // DNAOP: Regulatory documents. - Sections 7-11.
 7. Balabenko, E. V. Assessment and prerequisites for the development of the organizational and institutional mechanism of public-private partnership in housing construction in the Donetsk People's Republic / E. V. Balabenko // Manager. - 2021. - No. 1 (95). - pp. 4-15. - DOI 10.5281/zenodo.4786837. - EDN MKSFGL.
 8. Urban development aspects of selecting a land plot for the formation of municipal solid waste disposal facilities / E. V. Balabenko, L. N. Bogak, E. N. Oberemok, M. A. Chernysh // News of universities. Investments. Construction. Real estate. - 2023. - Vol. 13, No. 4 (47). - pp. 347-358. - DOI 10.21285/2227-2917-2025-2-347-358. - EDN CGXVOI.
 9. Balabenko, E. V. Administration of the organizational and institutional environment for the development of public-private partnerships in the construction complex / E. V. Balabenko // Beneficium. - 2024. - No. 4 (53). - pp. 6-14. – DOI 10.34680/BENEFICIUM.2024.4(53).6-14. – EDN BBZSZC.
 10. Organizational support of the effectiveness of design solutions in construction and housing and communal services / E. V. Balabenko, M. F. Ivanov, N. A. Pushkareva [et al.]. – Makeyevka: Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2025. – p.231 – EDN QYIYSL.
-



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 624.042.7

ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

¹Таймасханов М.М., Хегай А.О. (научный руководитель)

ФГБОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ», Санкт-Петербург, Россия (190005, город Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4), e-mail: ¹irasul02002@inbox.ru

В статье рассматривается проблема повторных сейсмических воздействий (афтершоков) и их влияния на безопасность зданий и сооружений. Актуальность исследования определяется тем, что после основного толчка несущие конструкции зданий могут находиться в повреждённом состоянии, вследствие чего последующие сейсмические события способны вызвать дальнейшее развитие повреждений, значительное снижение остаточной несущей способности и переход конструктивной системы в аварийное состояние. Цель работы — выявить закономерности влияния повторных сейсмических воздействий на техническое состояние зданий и обосновать необходимость их учёта при инженерном обследовании объектов в постсейсмический период. На основе данных о последовательности землетрясений в Турции 6 февраля 2023 года (M7,8 и M7,5) рассмотрены особенности повторных сейсмических событий и их практическое инженерное значение. Показано, что даже воздействие меньшей интенсивности на уже повреждённую конструкцию способно вызвать непропорционально большие разрушения. Сформулированы рекомендации по учёту афтершоков при обследовании зданий и оценке возможности их дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: Повторное землетрясение, афтершок, сейсмическое воздействие, безопасность зданий, повреждение конструкций, остаточная несущая способность, сейсмостойкость, обследование зданий.

INFLUENCE OF REPEATED SEISMIC IMPACTS ON THE SAFETY OF BUILDINGS AND STRUCTURES

¹Taimaskhanov M.M., Kheday A.O. (Academic Supervisor)

«SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE AND CIVIL ENGINEERING», St.Petersburg, Russia, (190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya street, 4) e-mail: ¹irasul02002@inbox.ru

The article addresses the problem of repeated seismic impacts (aftershocks) and their influence on the safety of buildings and structures. The relevance of the study is determined by the fact that after the main earthquake, the load-bearing structures of buildings may be in a damaged state, as a result of which subsequent seismic events can cause further development of damage, a significant reduction in residual load-bearing capacity, and transition of the structural system to an emergency state. The purpose of the work is to identify patterns of the influence of repeated seismic impacts on the technical condition of buildings and to justify the need to take them into account during engineering inspection of facilities in the post-seismic period. Based on data on the earthquake sequence in Turkey on February 6, 2023 (M7.8 and M7.5), the features of repeated seismic events and their practical engineering significance are considered. It is shown that even an impact of lower intensity on an already damaged structure can cause disproportionately large destruction. Recommendations are formulated for accounting for aftershocks when inspecting buildings and assessing the possibility of their further operation.

Keywords: Repeated earthquake, aftershock, seismic impact, building safety, structural damage, residual load-bearing capacity, seismic resistance, building inspection.

Введение.

Обеспечение безопасности зданий и сооружений в сейсмически опасных районах является одной из приоритетных задач современной строительной науки и инженерной практики. Действующие нормативные документы, в частности СП 14.13330.2018, регламентируют расчёт и проектирование объектов на воздействие основного расчётного землетрясения соответствующей интенсивности. Вместе с тем реальные сейсмические процессы нередко сопровождаются серией повторных толчков — афтершоков, которые в нормативной практике учитываются в значительно меньшей степени [1].

Практика ликвидации последствий разрушительных землетрясений показывает, что значительная часть обрушений происходит не в момент основного толчка, а при последующих сейсмических событиях, воздействующих на уже повреждённые конструктивные системы. Это обстоятельство делает проблему повторных сейсмических воздействий актуальной как для научных исследований, так и для инженерной практики при обследовании зданий после землетрясений [2, 3].

Данная статья посвящена анализу особенностей повторных сейсмических воздействий и их влияния на безопасность зданий из железобетонных и каменных конструкций, а также обоснованию необходимости учёта афтершоков при оценке возможности дальнейшей эксплуатации объектов в постсейсмический период.

Цель исследования

Цель настоящей работы состоит в выявлении закономерностей влияния повторных сейсмических воздействий на техническое состояние зданий и сооружений из железобетонных и каменных конструкций, а также в обосновании необходимости обязательного учёта афтершоков при инженерном обследовании объектов в постсейсмический период.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ особенностей повторных сейсмических событий с точки зрения воздействия на конструктивные системы зданий;
- рассмотрение механизмов накопления повреждений в железобетонных и каменных конструкциях при последовательных сейсмических нагрузках;
- анализ последствий последовательных землетрясений в Турции 6 февраля 2023 года на основе открытых данных;
- формулирование практических рекомендаций по учёту повторных воздействий при обследовании зданий.

Материал и методы исследования

В качестве материала исследования использованы данные сейсмологических служб — Геологической службы США (USGS) и Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (CSEM-EMSC) — о последовательности землетрясений в Турции 6 февраля 2023 года, а также опубликованные научные работы, посвящённые вопросам сейсмостойкости зданий и методам оценки технического состояния конструкций после сейсмических воздействий [4, 5].

Применялись следующие методы: анализ и систематизация научной литературы по теме исследования; сравнительный анализ карт макросейсмической интенсивности для основного

толчка и афтершока с использованием материалов USGS ShakeMap; качественный анализ закономерностей накопления повреждений в конструктивных системах при последовательных динамических воздействиях; обобщение практического опыта обследования зданий в постсейсмический период.

Исследование носит аналитический характер и опирается на системный подход к рассмотрению взаимосвязи между параметрами сейсмического воздействия (интенсивность, последовательность, временной интервал между толчками) и техническим состоянием конструктивной системы здания [3, 6].

Результаты исследования и их обсуждение

1. Особенности повторных сейсмических воздействий

С инженерной точки зрения повторное сейсмическое воздействие принципиально отличается от первоначального тем, что оно прикладывается к конструктивной системе, уже изменившей свои механические характеристики. Если после основного толчка в здании возникли трещины, остаточные деформации или снизилась жёсткость отдельных элементов, то последующий толчок даже меньшей интенсивности может вызвать существенно более неблагоприятную реакцию [4, 7].

В железобетонных конструкциях при первом сейсмическом воздействии происходят: раскрытие трещин в растянутых зонах сечений; снижение эффективной жёсткости вследствие образования трещин (эффект деградации жёсткости при циклическом нагружении); накопление пластических деформаций в арматуре при высоких уровнях нагрузки; нарушение сцепления арматуры с бетоном в узловых зонах [5, 6].

В каменных конструкциях — кирпичной кладке, блочной кладке — повреждения от первого толчка, как правило, выражаются в образовании диагональных трещин в стенах, расслоении кладки, нарушении связи между ортогональными стенами и перекрытиями. Перечисленные повреждения существенно снижают способность конструкции воспринимать горизонтальные нагрузки при последующем воздействии [7, 8].

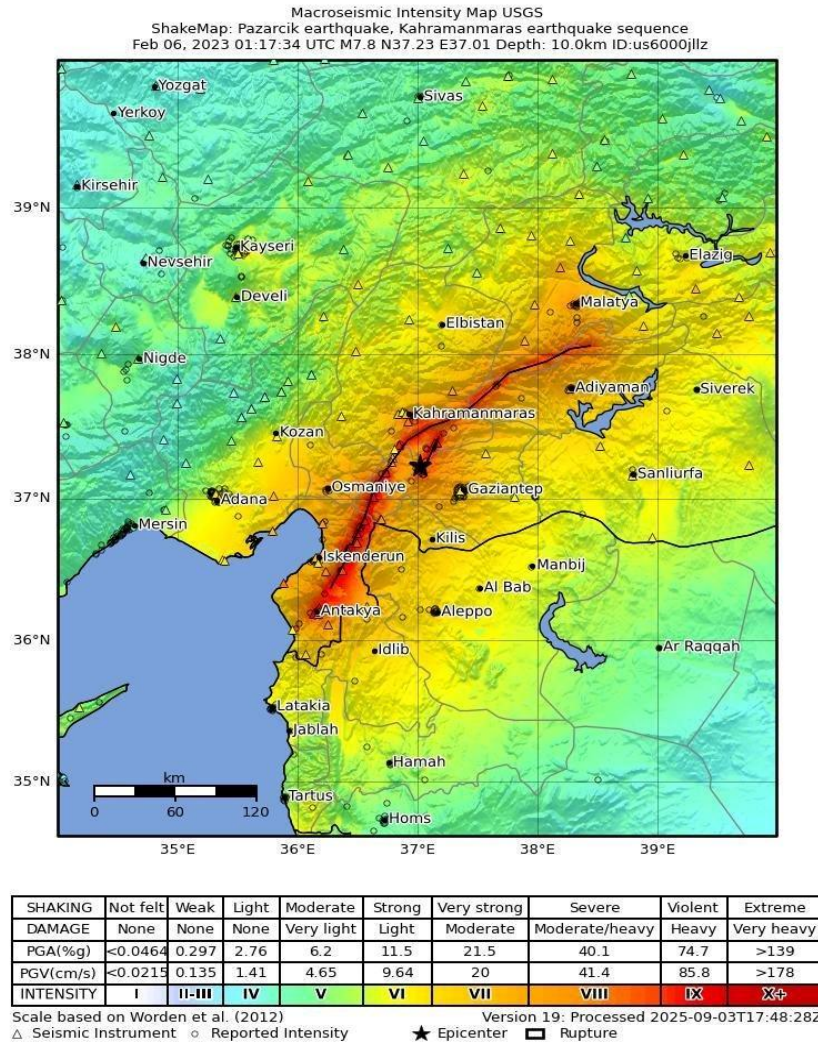


Рисунок 1 - Карта макросейсмической интенсивности от землетрясения M7,8 (01:17 UTC, 06.02.2023). Источник: USGS ShakeMap

2. Механизм накопления повреждений

Ключевым понятием при анализе влияния повторных воздействий является накопление повреждений. Под ним понимается постепенное и необратимое ухудшение механических свойств конструктивных элементов под воздействием последовательных нагрузок. Данный процесс обусловлен рядом факторов.

Во-первых, снижение жёсткости повреждённой конструкции приводит к изменению её динамических характеристик: увеличению периода собственных колебаний и смещению резонансного пика. В результате при повторном толчке конструкция может попасть в резонанс с частотным составом волны, что значительно увеличит динамическую реакцию по сравнению с расчётной [3, 6].

Во-вторых, уже образовавшиеся трещины являются концентраторами напряжений. При повторном нагружении именно в зонах трещин происходит ускоренное развитие повреждений: расширение существующих трещин, образование новых, выкрашивание бетона в сжатых зонах, потеря устойчивости сжатой арматуры.

В-третьих, в результате первого толчка могут нарушиться связи, обеспечивающие пространственную работу конструктивной системы: диафрагмы жёсткости, узлы сопряжения

колонн с ригелями, анкеровка плит перекрытий. Нарушение пространственной работы здания резко снижает его способность перераспределять усилия и, как следствие, сейсмостойкость в целом [4, 8].

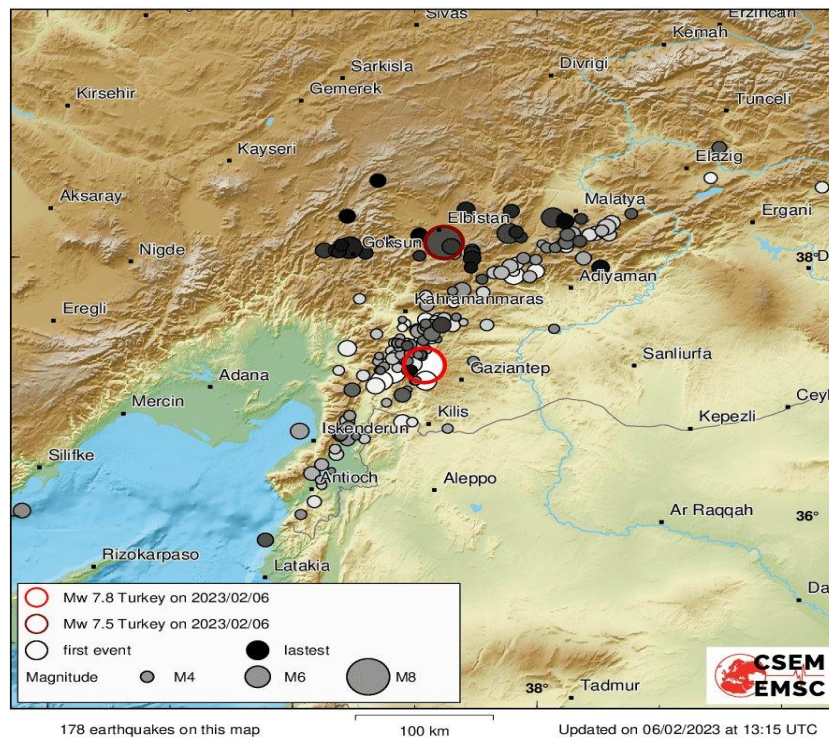


Рисунок 2 - Распределение афтершоков последовательности землетрясений в Турции 06.02.2023. Источник: CSEM-EMSC

3. Анализ последовательных землетрясений в Турции 6 февраля 2023 года

6 февраля 2023 года на юго-востоке Турции произошло одно из наиболее разрушительных землетрясений в истории страны. Первый толчок магнитудой M7,8 был зафиксирован в 01:17 UTC вблизи Газиантепа на глубине около 18 км в зоне Восточно-Анатолийского разлома. Данное событие охватило значительную площадь воздействия: интенсивность сотрясений достигла VIII–IX баллов по шкале MSK на территории нескольких провинций Турции и северной Сирии [9].

Через 9 часов, в 10:24 UTC, в районе Эльбистана (провинция Кахраманмараш) был зафиксирован второй крупный толчок магнитудой M7,5 на глубине около 7 км. Несмотря на то что по параметрам источника второй толчок был несколько слабее первого, его последствия оказались катастрофически масштабными — прежде всего потому, что он воздействовал на конструкции, уже повреждённые в ходе первого события [9, 10].

Анализ данных USGS ShakeMap показывает, что зоны максимальной интенсивности двух событий частично перекрывались, что привело к суммированию ущерба на значительной части территории. Ряд зданий, устоявших после первого толчка при наличии ограниченных повреждений, обрушился в ходе второго события. Это подтверждает, что афтершок M7,5 выступил не просто как самостоятельное разрушительное событие, но и как нагрузка, критическая именно для уже ослабленных конструкций [9].

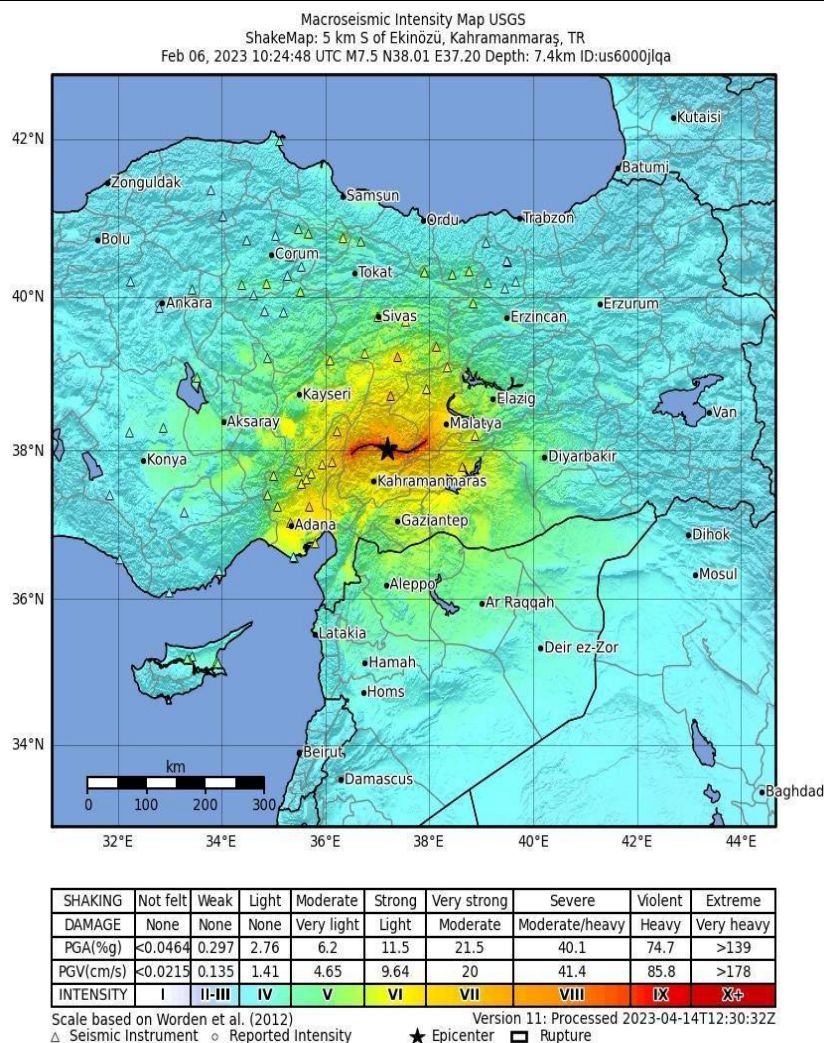


Рисунок 3 - Карта макросейсмической интенсивности от афтершока M7,5 (10:24 UTC, 06.02.2023) — второй крупный толчок через 9 часов после основного. Источник: USGS ShakeMap

4. Подходы к оценке зданий с учётом повторных воздействий

С практической точки зрения проблема повторных сейсмических воздействий требует системного подхода к обследованию зданий после землетрясений. Стандартная визуальная оценка по критерию «обрушилось / не обрушилось» недостаточна: здание может сохранять внешнюю устойчивость при критическом снижении несущей способности.

При обследовании в постсейсмический период необходимо оценивать:

- характер и ширину раскрытия трещин в несущих элементах (колоннах, ригелях, стенах, узлах);
- наличие остаточных горизонтальных смещений этажей (межэтажный дрейф);
- состояние узловых сопряжений и анкеронок;
- сохранность диафрагм жёсткости и вертикальных связевых элементов;
- наличие признаков потери устойчивости сжатых элементов (выпучивание, выкрашивание защитного слоя).

Результаты обследования должны интерпретироваться с учётом прогноза возможных повторных толчков. Если вероятность значимых афтершоков остаётся высокой, допустимый уровень повреждений для принятия решения о продолжении эксплуатации здания должен быть существенно ужесточён по сравнению со стандартными критериями [3, 8].

Перспективным инструментом является применение геоинформационных систем (ГИС) для моделирования зон сейсмического воздействия с учётом грунтовых условий, тектоники и рельефа, а также баз данных по сейсмостойкости зданий. Такой подход позволяет оперативно выявить наиболее уязвимые объекты в зоне повторного толчка и приоритизировать мероприятия по защите населения [2].

Выводы

- Повторные сейсмические воздействия (афтершоки) представляют самостоятельную и серьёзную угрозу безопасности зданий и сооружений, поскольку действуют на конструктивные системы, уже находящиеся в повреждённом состоянии после основного толчка.
- В железобетонных и каменных конструкциях под воздействием основного землетрясения происходит необратимое снижение жёсткости, накопление остаточных деформаций, нарушение пространственной работы системы. Совокупность этих изменений делает конструкцию непропорционально уязвимой к последующим динамическим нагрузкам.
- Последовательность землетрясений в Турции 6 февраля 2023 года (M7,8 и M7,5 с интервалом 9 часов) является показательным примером: второй толчок, при меньшей магнитуде, вызвал катастрофические разрушения среди объектов, выстоявших после первого события.
- При обследовании зданий в постсейсмический период необходим комплексный подход, включающий не только фиксацию видимых повреждений, но и оценку остаточной несущей способности конструктивной системы с учётом высокой вероятности повторных толчков.
- Действующие нормативные требования в области сейсмостойкого строительства нуждаются в дополнении положениями, регламентирующими учёт последовательных сейсмических воздействий как на стадии проектирования новых зданий, так и при оценке безопасности существующих объектов после землетрясений.
- Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку методики количественной оценки остаточной сейсмостойкости зданий с учётом накопленных повреждений, а также на совершенствование нормативной базы в части обследования зданий после землетрясений.

Список литературы

1. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. – М.: Минстрой России, 2018. – 116 с.

2. Нигметов Г.М., Нигметов Т.Г., Савинов А.М. Оценка опасности повторных сейсмических толчков и риска для населения после катастрофического землетрясения // *Фундаменты*. – 2023. – № 4. – С. 14–17.
3. Лузин В.И., Бубис А.А. Поведение железобетонных конструкций при повторных сейсмических воздействиях // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. – 2020. – № 3. – С. 28–35.
4. Iervolino I., Giorgio M., Chioccarelli E. Markovian modeling of seismic damage accumulation // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. – 2016. – Vol. 45. – P. 441–461.
5. Мкртычев А.В. Надёжность и безопасность зданий и сооружений при нескольких последовательных сейсмических событиях // *Строительство и реконструкция*. – 2019. – № 2. – С. 12–21.
6. Fajfar P. Analysis in seismic provisions for buildings: past, present and future // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2018. – Vol. 16 (7). – P. 2567–2608.
7. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2014. – 54 с.
8. Степанов В.В., Поляков В.С. Обследование зданий в постсейсмический период: методические рекомендации. – М.: ЦНИИПРОМЗДАНИЙ, 2017. – 88 с.
9. United States Geological Survey (USGS). М 7.8 – Pazarcik earthquake, Kahramanmaras earthquake sequence [Электронный ресурс]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz> (дата обращения: 15.03.2025).
10. ОЧА. Turkiye Earthquake: USGS Macroseismic Intensity & Damage Levels Map [Электронный ресурс]. – United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, 2023. – URL: <https://reliefweb.int> (дата обращения: 15.03.2025).

References

1. SP 14.13330.2018. Construction in Seismic Areas. Updated Version of SNiP II-7-81*. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2018, p.116
2. Nigmatov, G.M., Nigmatov, T.G., Savinov, A.M. Assessing the Hazard of Aftershocks and the Risk to the Population after a Catastrophic Earthquake // *Foundations*. 2023, No. 4, pp. 14–17.
3. Luzin, V.I., Bubis, A.A. Behavior of Reinforced Concrete Structures under Repeated Seismic Impacts // *Earthquake Engineering. Safety of Structures*. 2020, No. 3, pp. 28–35.
4. Iervolino I., Giorgio M., Chioccarelli E. Markovian modeling of seismic damage accumulation // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. - 2016. - Vol. 45. - pp. 441-461.
5. Mkrtychev A.V. Reliability and safety of buildings and structures under several consecutive seismic events // *Construction and reconstruction*. - 2019. - No. 2. - pp. 12-21.
6. Fajfar P. Analysis in seismic provisions for buildings: past, present and future // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2018. - Vol. 16 (7). - pp.. 2567-2608.
7. GOST 31937-2011. Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition. – Moscow: Standartinform, 2014. – p. 54
8. Stepanov V.V., Polyakov V.S. Survey of buildings in the postseismic period: methodological recommendations. – Moscow: TsNIIPROMZDANII, 2017. – p. 88
9. United States Geological Survey (USGS). М 7.8 – Pazarcik earthquake, Kahramanmaras earthquake sequence [Electronic resource]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz> (date of access: 15.03.2025).

10. OCHA. Turkish Earthquake: USGS Macroseismic Intensity & Damage Levels Map [Electronic resource]. – United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, 2023. – URL: <https://reliefweb.int> (access date: 03/15/2025).
-